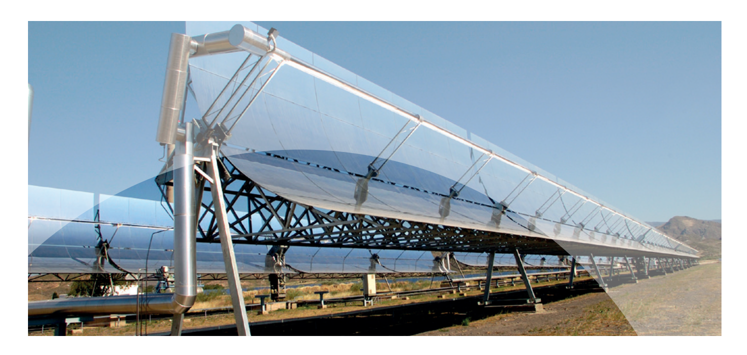




تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية



Concentrating Solar Plant Technologies CSP







مراجعة دكتور مهندس
محمد موسى عمران

دكتور مهندس
كاميليا يوسف محمد

العبقرية هي:

1 % من الإلهام

99 % من السعي الجاد

توماس إدسون

مقدمة

كشفت أزمة البترول في عام 1970 عن مدى أهمية الوقود الأحفوري كمصدر للطاقة في العالم، ومنذ ذلك الحين لاقت الأبحاث العلمية في مجال تكنولوجيا الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح إهتماما واسعا.

تتصف الطاقة الشمسية بأنها المستقبل لمصادر الطاقة البديلة نظرا لأنها غير ملوثة للبيئة ولايصدر عنها غازات الإحتباس الحراري المؤثر على المناخ العالمي والناتجة من استخدام الوقود الأحفوري، أي أن الطاقة الشمسية ليس لها آثار سلبية كما أنها مقبولة بيئيا. ومع تطور الأبحاث العلمية مستقبلا، سوف تنخفض تكاليف الطاقة الكهروشمسية وتزيد كفاءتها وستصبح الطاقة الشمسية عالميا هي المصدر الرئيسي للطاقات المتجددة نظرا لإمكانياتها الهائلة ومزاياها طويلة المدى.

تعتبر جمهورية مصر العربية من أكثر الدول التي تتميز بالسطوع الشمسي طوال العام لذا اتجهت الدولة ممثلة في قطاع الكهرباء والطاقة المتجددة لاستغلال الطاقة الشمسية وخاصة في انتاج الطاقة الكهربائية مباشرة باستخدام تكنولوجيا الفوتوفلتية، أو انتاج طاقة كهربائية باستخدام المركزات الحرارية الشمسية (الطريقة غير المباشرة)، باعتبارهما من وسائل استراتيجيات الطاقة لتوفير الاحتياجات المستقبلية من الطاقة الكهربائية.

تهدف استراتيجية الطاقة الجديدة والمتجددة إلى زيادة نسبة الطاقة المولدة من الطاقات المتجددة إلى 20% من اجمالي الطاقة الكهربائية المولدة في مصر عام 2022 والوصول الى نسبة 42 % حتى عام 2035.

وقد تبنى قطاع الكهرباء مشروع إنشاء محطات طاقة شمسية فوتوفلتية أعلى أسطح المباني وذلك بعد اختيار الأماكن المناسبة والمتاحة لتركيب الخلايا الفوتوفولتية.

كما تمت تجربة التشغيل التجاري لمشروع أول محطة شمسية حرارية لإنتاج الكهرباء قدرة 140 م.وات منها 20 م.وات مكون شمسي بمنطقة الكريمات والتى

تعمل بنظام مزدوج للتوليد الشمسي / الحراري باستخدام تكنولوجيا المركزات الشمسية بالإرتباط مع الدورة المركبة التي تستخدم الغاز الطبيعي كوقود.

كان افتتاحى فى 2018/2/27 لمحطة طاقة شمسية نموذجية متعددة الاغراض بتكنولوجيا المركزات الشمسية ببرج العرب - اسكندرية ، مبعث سعادة لي لاهميتها التعليمية، كذلك هناك اتفاقيات لبناء محطة طاقة شمسية ضخمة بقدرات تصل الى 1465 ميجا وات فى منطقة تبعد نحو 50 كيلو مترا شمال أسوان وتعد اكبر محطة لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية.

لقد أعطى قطاع الكهرباء مزيدا من الإهتمام بتدريب وتجهيز ورفع وعي وطاقات الكوادر البشرية من المهندسين والفنيين في مجالات الطاقة الشمسية الفوتوفلتية والحرارية المركزية، و كان اصدار هذا الكتاب "**تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية**" باللغة العربية تشجيعا على القراءة وتحصيل العلم، وحفاظا على اللغة العربية. وأتمنى من الله أن يستفيد أبنائى المهندسين والفنين من هذا الكتاب
والله الموفق لخير مصر

وزير الكهرباء والطاقة المتجددة
دكتور مهندس/ محمد شاكر المرقبى

مقدمة

نتيجة تزايد الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة غير المتجددة مثل البترول والغاز الطبيعى بمعدلات مرتفعة، أصبح لزاما الاهتمام بتشجيع استخدام مصادر الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية.

تحصل الأرض على 174 بيتا وات من الاشعاع الشمسي في الغلاف الجوي العلوي، وينعكس حوالي 30% إلى الفضاء ويتم امتصاص باقي الكمية من قبل المحيطات والغيوم وكتلة الأرض.

تعتبر مصر إحدى دول منطقة الحزام الشمسي حيث تتمتع باشعاع شمسي مباشر يصل إلى 3200 ك و.س/م2 سنويا، اعتمادا على الموقع والوقت من اليوم والوقت من السنة بالاضافة إلى الظروف الجوية.

يمكن تصنيف تكنولوجيا الطاقة الشمسية إلى نشطة وسالبة، ومن أمثلة التكنولوجيا النشطة كل من الخلايا الفوتوفلتية (والتي تعرف بالطريقة المباشرة لإنتاج الكهرباء) ومركزات الطاقة الحرارية الشمسية (والتي تعرف بالطريقة غير المباشرة لإنتاج الكهرباء)، أما التكنولوجيا السالبة فمن أمثلتها تحسين دوران الهواء وتوجيهه لإستخدام ضوء الشمس بشكل ايجابي في الفراغات.

كما يوجد العديد من الحقائق عن الطاقة الشمسية التي تقيم امكانياتها، واللازمة لتلبية احتياجات الطلب على الطاقة، فإنها لاتنتج أية ملوثات، وصيانتها منخفضة، مع سهولة التشغيل والتركيب. وعلى الرغم من أن كثير من الدول قد بدأت في التوسع في استخدام الطاقة الشمسية على نطاق واسع فإنه يتعين على أغلب هذه الدول أن تقطع شوطا كبيرا لاستغلال هذه الطاقات، حيث أن الاستثمار في الطاقة الشمسية يؤدي الى الوصول إلى تكاليف فعلية وانخفاض تلوث الهواء والمياه والحد من انبعاثات الغازات الدفيئة.

تعتمد النظم الشمسية المركزية الحرارية لإنتاج الكهرباء على استبدال مصادر الوقود المستخدمة بالمحطات الحرارية التقليدية لإنتاج الكهرباء بالطاقة الحرارية المنتجة من تركيز الإشعاع الشمسي، حيث تتميز هذه الأنظمة بإمكانية تكاملها مع النظم التقليدية لإنتاج الكهرباء وكذلك تضمن امدادات منتظمة للكهرباء ولاتسبب مشكلات لتشغيل الشبكة الكهربائية العامة.

من المشروعات المقامة في مصر المحطة الشمسية الحرارية بالكريمات والتي تعد أكبر مشروع ضمن ثلاثة مشروعات تم تنفيذها على مستوى قارة أفريقيا، في المغرب والجزائر ومصر وجميعها تعتمد على ارتباط الدورة المركبة بالحقل الشمسي.

بين أيدينا كتاب **"تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية"** والذي يشتمل على:
أنواع تكنولوجيات محطات المركزات الشمسية، فرسنيل الخطية، طبق قطع مكافئ، الأبراج الشمسية، حوض القطع المكافئ، مائع نقل الحرارة، أنظمة تخزين الطاقة الحرارية، اقتصاديات محطات المركزات الشمسية الحرارية، انتاج الطاقة، ثم تطبيقات.

مع تمنياتي من الله أن يستفيد بهذا العمل أبناءنا المهندسين والفنيين وفقنا الله إلى مافيه خير أمتنا بالعلم والتقدم والرقي.

د.م. / محمد موسى عمران
وكيل أول وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة
للبحوث والتخطيط ومتابعة الهيئات

مقدمة المؤلف

تتمتع مصر بثروة في مصادر الطاقة المتجددة، خاصة الطاقة الشمسية، نظرا للموقع الجغرافي المتميز لمصر بين مداري السرطان والجدي، ولقد اهتم قطاع الكهرباء بالطاقة الشمسية في مجالي انتاج الكهرباء ونشر التوعية بها.

ففي شهر مارس 2018 حدثت عدة أحداث عظيمة لها علاقة بالطاقة الشمسية:

- أصبحت مصر عضوا مؤسسا في التحالف الدولي للطاقة الشمسية حيث وقع د/ محمد شاكر وزير الكهرباء والطاقة المتجددة الاتفاق الاطاري للتحالف وبحضور سفير الهند في القاهرة، يهدف هذا التحالف إلى علاج التحديات المتعلقة بالطاقة الشمسية وتوسيع نطاق استخدامها في الدول الأعضاء بما يتوافق مع احتياجاتها.
- دشن السيد الدكتور/وزير الكهرباء والطاقة المتجددة أول محطة شمسية لانتاج الكهرباء بمجمع بنبان الشمسي في أسوان، بقدرة 50 م.وات من اجمالي عدد 32 محطة شمسية فرعية تنتج 50 م.وات من كل محطة باجمالي قدرات 1600 م.وات. علما بأن المشروع مقام على مساحة 8843,3 فدان على الطريق الصحراوي "أسوان- القاهرة" بقرية بنبان.
- بعد عدة سنوات من الأبحاث المشتركة مع ايطاليا ودول الاتحاد الأوروبي تم افتتاح محطة مركزات شمسية حرارية (CSP) بقدرة 1 م.وات من الكهرباء وما يقارب من 250 مترا مكعبا من المياه المحلاة، وذلك بمدينة الأبحاث العلمية - برج العرب – الإسكندرية.

بالاضافة إلى ذلك فقد صدر أول أطلس شمسي متجدد لمصر، والذي قام على حسابات الطاقة الشمسية ومناطقها، للاستفادة بعمل محطات المركزات الشمسية والألواح الفوتوفلتية.

ونظرا لإهتمام قطاع الكهرباء بالطاقة الشمسية في انتاج الكهرباء، كان دعم السيد الدكتور/ وزير الكهرباء والطاقة المتجددة لإصدار كتاب:"**تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية**" والذي يحتوي على 12 باب هي: تاريخ محطات المركزات الشمسية، الإشعاع الشمسى، تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية،

مائع نقل الحرارة، أنظمة تخزين الطاقة الحرارية، محطات قوي فرسنل الخطية، محطات قوي مجمعات طبق قطع مكافئ، محطات قوى مجمعات الأبراج الشمسية، محطات قوي مجمعات حوض قطع مكافئ، اقتصاديات محطات المركزات الشمسية الحرارية، انتاج الطاقة من محطات المركزات الشمسية الحرارية، تطبيقات لمحطات المركزات الشمسية الحرارية بمصر.

وقد قام بمراجعة الكتاب السيد د.م. / محمد موسى عمران وكيل أول وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة للبحوث والتخطيط ومتابعة الهيئات، والذى أضفى قيمة ثمينة للكتاب وساعد سيادتة فى اخراج الكتاب بالصورة التى ظهر بها.

وأتقدم للسيد الفاضل دم/ محمد شاكرالمرقبي وزير الكهرباء والطاقة المتجددة على تفضل سيادته بكتابة مقدمة الكتاب وعلى دعمه وتشجيعه الدائم للمهندسين والفنيين العاملين على البحث العلمي وتعلم الجديد في المجالات المتعلقة بالطاقة الكهربائية والطاقات المتجددة.

كما نقدم الشكر إلى "اللجنة المصرية الألمانية المشتركة للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة وحماية البيئة" (JCEE) على قيامها بطباعة الكتاب.

أتمنى من الله أن يستفيد من هذا الكتاب المهندسين والفنيين العاملين بمجال الطاقات المتجددة وأن يضعوا أمام أعينهم المقومات الأساسية للتعليم وهي: التدريب – الدراسة – الإطلاع.

والله نسأل أن يتقبل منا هذا العمل خالصا لوجهه الكريم.

أكتوبر 2018

د.م/كاميليا يوسف محمد

محتويات كتاب
تكنولوجيا المركزات الشمسية الحرارية

Abbreviation

CSP	Concentrating solar plant
CST	Concentrating solar thermal plant
CRg	Geometric concentration ratio
DNI	Direct Normal Irradiance
ET	Euro Trough
ENEA	L'Energia e l'Ambiente (Italian National Board for New Technology, Energy and the Environment)
FR	Collector heat removal factor
FRs	Fresnel Reflectors
H	Hydrogen
He	Helium
HRSG	Heat Recovery Steam Generator
HTF	Heat Transfer Fluid
IEA	International Energy Agency
IST	Industrial Solar Technology
LFR	Linear Fresnel reflector
LFC	Linear Fresnel collector
LS	Luz System
MATS	Multipurpose Applications by Thermodynamic Solar
ORC	Organic Rankine Cycle
P	Poise
PB	Power Block
PCU	Power Conversion Unit
PT	Parabolic Trough
PTC	Parabolic trough collector
PV	Photovoltaic
SCA	Solar Collector Assembly
SCA	Solar Collector Array
SM	Solar Multiple
SM	Stretched membrane
SEGS	Solar Electric Generating System
SEGS	Solar Energy Generating System
TES	Thermal energy storage systems

الباب الأول
تاريخ محطات المركزات الشمسية
Concentrating Solar Power (CSP) Plants History

من المعلوم وجود صعوبة اقتصادية لتخزين الطاقة الكهربائية المنتجة من الوقود التقليدي والتي يجب استخدامها فور انتاجها، منعا (أو تقليلا) لاهدار وفقد بعض الطاقة الكهربائية المنتجة. بينما في مجال الطاقة الشمسية (solar energy) فإنه يمكن تخزين الطاقة الشمسية في صورة طاقة حرارية مثلا (الحرارة المجمعة من الشمس)، وقد تمكنت التقنيات الحديثة من خلال تخزين الطاقة الشمسية أن تكون الطاقة الحرارية متوفرة حتي في الفترات التي لا تشع الشمس فيها، مما يساعد علي توفير الوقود الأحفوري.

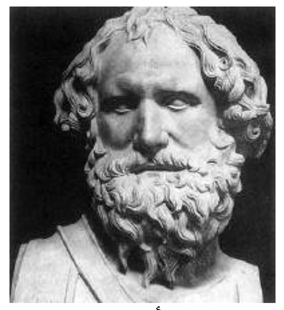
تصنف تكنولوجيات الطاقة الشمسية (solar energy) إلي:

- الطاقة الكهروشمسية (أو الكهروضوئية) (Photovoltaic).
- تسخين شمسي (المياه) (Solar heating (water)).
- الطاقة الحرارية الشمسية (Solar thermal power).

تعتمد الأنظمة الشمسية الحرارية لانتاج الكهرباء، علي استبدال الوقود الأحفوري المستخدم بالمحطات الحرارية التقليدية لانتاج الكهرباء بالطاقة الحرارية الناتجة من تركيز الاشعاع الشمسي عند درجات حرارة عالية (400°C : 1500°C).

من مميزات أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية:

- يمكن أن تتكامل مع الأنظمة التقليدية لانتاج الكهرباء.
- تضمن امدادات منتظمة للطاقة الكهربائية.
- انتاج الطاقة الكهربائية النظيفة ليلا أو نهارا.



العالم أرشميدس

تطور تاريخ محطات المركزات الشمسية:

1. منذ سنة 200 قبل الميلاد وصف عالم الرياضيات الفيزيائى المخترع اليونانى المهندس أرشميدس (Archimedes)(المولود بإيطاليا عام287 قبل الميلادشكل (1)) فكرة الألواح العاكسة لتركيز الشمس



شكل (1) فريسكو(1599 – 1600) في معرض أوفيزي، فلورنسا، أظهرجوليو باريجي أشعة أرشميدس المدمرة.

2. في القرن الثاني قبل الميلاد(375-295) وصف عالم الرياضيات اليوناني ديوكليس (Diocles) (شكل(2)) الخصائص البصرية لحوض صغير قطع مكافئ (PT) (parabolic trough).



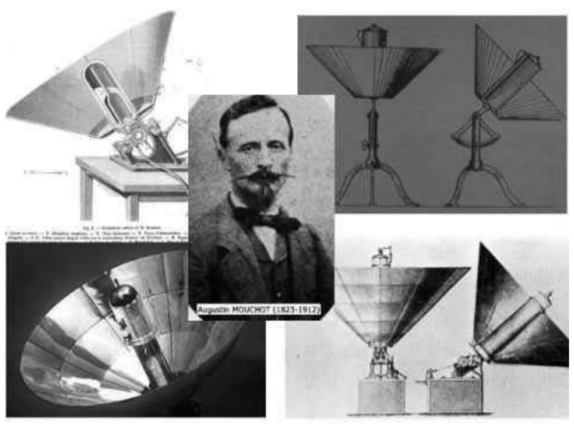
شكل (2) العالم ديوكليس.

3. في عام 1746 وصف العالم الفرنسي الكونت دي بوفون (Conte de Buffon) (عالم الطبيعيات والرياضيات والكونيات :(1707-1788))(شكل (3))تطوير تصميمات الهليوستات (heliostat) (هى أداة ذات مرآه تعكس الشمس في اتجاه واحد).



شكل (3) العالم الكونت ديبوفون.

4. في عام 1866 استخدم المخترع الفرنسي أوجستين موشوت (Augustin Mouchot) (عالم الرياضيات والفيزياء 1825-1911) (شكل (4)) حوض قطع مكافئ لانتاج البخار لأول ماكينة بخار بالشمس وفي عام 1878اخترع نظام محرك بخار مدفوع بطبق (dish) والذي عرض بالمعرض العالمي بباريس.



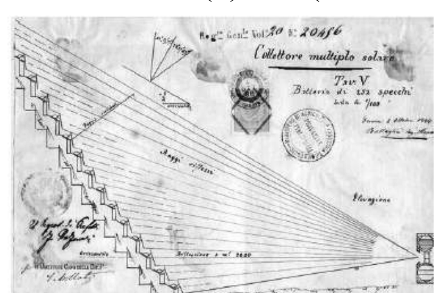
شكل (4) العالم أوجستين موشوت.

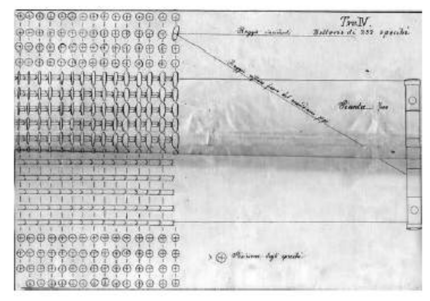
5. فى عام 1880 أنشأ المهندس الميكانيكى العالم الأميركى / السويدى جون إركسون (1803-1889) John Ericsson (شكل (5)) أول مجمع حوض قطع مكافىء واستخدمة كمصدر لماكينة هواء ساخن.



شكل (5) العالم جون إركسون.

6. في عام 1886 سُجل أول اختراع لمجمع شمسي بمعرفة العالم الايطالي الساندرو باتاجليا (Alessandro Battaglia) (1842 – n.a) شكل (6).

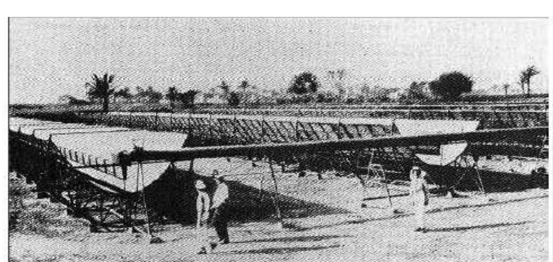




شكل (6) اختراع لمجمع شمسي للعالم الساندرو باتاجليا.

7. في عام 1913 نجح العالم الأمريكي فرانك شومان (Frank Shuman) (1862-1918) في بناء حوض قطع مكافئ لادارة نظام ضخ في مصر بمنطقة المعادي، شكل (7) ، وقد استخدم عدد 5 أحواض قطع مكافئ طول كل حوض 60 متر،

لتركيز أشعة الشمس خطيا مع نظام تتبع شمسى، ثم تركز الأشعة علي غلاية تكفي انتاج بخار لضخ حوالي 23000 لتر مياه في الدقيقة، (قدرة 55 HP).




شكل (7) حوض قطع مكافئ لادارة نظام ضخ في مصر.

8. خلال القرن العشرين تمت كثير من التجارب والنماذج
9. في عام 1929 تم بناء أول نظام محطة حرارية شمسية بطبق مرايات بواسطة العالم الأميركي دكتور روبرت هوتشنج جودارد Robert Hutchings) (Goddard (1882–1945)، شكل (8).



شكل (8)العالم الأميركي دكتور روبرت هوتشنج جودارد.

10. في عام 1968 تم تشغيل أول محطة شمسية مركزية بايطاليا.
11. فى عام1983تم التشغيل بنجاح لأول ماكينة حرارية بتمويل خاص فى أريزونا، تحتوي على مجمعات حوض قطع مكافىء بمساحة 5580 متر مربع لانتاج تسخين حراري بدرجات حرارة أعلى من 260 ^oC لشركة أعمال نحاس.

12. في عام 1983 كانت الولادة الحقيقية لمحطات المركزات الشمسـية) Concentrating Solar Power) (CSP) كأساس الصناعة في كاليفورنيا، حيث وُضعت سياسة لانشاء 9 أحواض قطع مكافئ منفصلة بقدرة إجمالية $354\ MW_e$ ، لهذه المحطات أكثر من 2000000 متر مربع مساحة مرايات.

ويوضح جدول (1) خصائص هذه المحطات الشمسية المركزة ويوضح شكل(9) المحطتان 3&7 بكاليفورنيا - أمريكا.

13. منذ عام 2006 شهد انتاج الطاقة الشمسية المركزة نموا كبيرا في أسبانيا وأمريكا لتحويل الطاقة الشمسية (أشعة الشمس) إلي طاقة كهربائية مع مراعاة أن تكون السماء صافية والضوء قوي، وتتوافر هذه الظروف الطبيعية في: جنوب غرب أمريكا - المكسيك - شمال افريقيا - الشرق الأوسط - وسط آسيا - جنوب أفريقيا - استراليا - جنوب أوروبا - وأجزاء من الصين والهند.

14. في عام 2014 تم التشغيل التجاري لأكبر محطة في العالم للطاقة الحرارية الشمسية بقدرة $392\ MW_e$ كاليفورنيا - أمريكا.

يوضح شكل (10) عملية البخاربشركة a pharmaceutical – مصر بقدرة 1330 Kw ودرجة حرارة التشغيل 173^o C
يوضح جدول (2) تطور سعات محطات المركزات الشمسية (Concentrating solar power) (CSP) في العالم منذ عام 1984 وحتي 2016.
ويوضح جدول (3) توزيع سعات محطات المركزات الشمسية في عام 2016.



شكل (9) المحطتان 3&7 بكاليفورنيا – أمريكا.
source: Sandia National Laboratory



شكل (10) عملية البخار بشركة a pharmaceutical– مصر.
Source: SEGS solar plants in California (Sandia National Laboratory)

جدول (1) خصائص عدد 9 محطات مركزات شمسية

رقم المحطة	سنة بداية التشغيل	اجمالي المخرج (MW_e)	درجة حرارة مخرج الحقل الشمسي (C°)	مساحة الحقل الشمسي (m^2)	كفاءة التربينة(%)	المخرج السنوي (GWha)	تجهيزات
1	1985	13.8	307	82960	31.5/-	30	تخزين حراري (3hr)
2	1986	30.0	316	190338	29.4/37.3	80	محمصات تعمل بالغاز
¾	1987	30.0	349	230300	30.6/37.4	93	غلاية غاز
5	1988	30.0	349	250500	30.6/37.4	93	غلاية غاز
6	1989	30.0	390	188000	37.5/39.5	91	غلاية غاز
7	1989	30.0	390	194280	37.5/39.5	93	غلاية غاز
8	1990	80.0	390	464340	37.6/37.6	253	سخان سوائل بالمبادل الحرارى يعمل بالغاز
9	1991	80.0	390	483960	37.6/37.6	256	سخان سوائل بالمبادل الحرارى يعمل بالغاز

Source: SEGS Solar Plants in California (Sandia National Laboratory)

جدول (2) تطور سعات CSP في العالم

السنة	السعة المركبة MW_p	السعة التراكمية MW_p
1984	14	14
1985	60	74
1989	200	274
1990	80	354
00	00	354
2006	1	355
2007	74	423
2008	55	484
2009	179	663
2010	307	969
2011	629	1598
2012	803	2553
2013	872	3425
2014	925	4335
2015	420	4705
2016	110	4815

Source:REN21. CSP - World.com, IRENA.

جدول (3-1) توزيع سعات محطات المركزات الشمسية CSP في 2016

البلد	السعة MW_p
أسبانيا	2300
الولايات المتحدة	1738
الهند	225
جنوب أفريقيا	(added)200+100
المغرب	180
الامارات العربية المتحدة	100
الجزائر	25
مصر	20
استراليا	12
الصين	(added)10+10
تايلاند	5

Source: REN21 Global status Report. June 2017



الباب الثانى
الإشعاع الشمسى
Solar radiation

تعتبر الطاقة الشمسية هى المصدر الرئيسى والهام الذى يمد الأرض بالطاقة، تقوم الشمس بإمداد الأرض بطاقة تزيد عن إجمالى إحتياجات العالم من الطاقة بنحو 5000 مرة حيث أن الطاقة التى يمكن الحصول عليها من أشعة الشمس لمدة 105 دقيقة تكفى احتياجات واستهلاكات العالم أجمع لمدة عام (http://forum.arab-mms.com/t215307.html).

الإشعاع الشمسي هو مقدار الأشعة الشمسية الساقطة على مساحةٍ معينة و القادرة على انتاج طاقة كهربائية . ولا يصيب الأرض إلا حوالي جزء من ألفي مليون جزء من أشعة الشمس التي تقدر بنحو 130 ميجاوات لكل متر مربع من سطح الشمس، وهذا القدر الضئيل هو المسئول عن كل الطاقة الحرارية لسطح الأرض و غلافها الجوي.

ترجع معظم مصادر الطاقة إلى الإشعاعات الشمسية فجميع أنواع الطاقة (البترول – الغاز – الفحم) تكونت بسبب أشعة الشمس .

تتأثرشدة الإشعاع الشمسى قبل الوصول إلى الأرض بعاملين أساسين:

- الغلاف الجوى
- الزوايا الشمسية

يمكن توقع شدة الإشعاع الشمسى فى موقع ما من الأرض اعتمادا على موقعه على الكرة الأرضية والزمن (اليوم – الشهر – السنة) . فيما يلى بعض التعريفات الهامة للإشعاع:

حزمة الإشعاع (Beam radiation)

هو الإشعاع الحادث من اتجاه الشمس. وهذا يعني أنه لا يحتوى على أشعة متناثرة.

ويمكن حساب اتجاه حزمة الإشعاع لكل مكان في العالم (كل خط عرض وخط طول)، لأى زمن من السنة، وذلك باستخدام العلاقات الهندسية المتاحة. ويمكن قياس شـــدة الإشعاع باستخدام المشـــماس (وهو لقيــاس طاقة الشمس الإشــعاعية) أي مقياس بيرهليوميتر (normal incidence pyrheliometer).

الإشعاع المنتشر أو المتناثر (Diffuse radiation)

هو الإشعاع الذي يتم تلقيه من الشمس بعد أن يتناثر من قبل الجو والسحب. يمكن أن يصل الإشعاع المنتشر إلى 100٪ من الإشعاع الوارد فى الأيام الغائمة، ويكون أعلى

من 10٪ فى الأيام المشرقة جدا. ويمكن قياس الإشعاع المنتشر بالظل- باستخدام مقياس بيرهليوميتر الذي يمنع الإشعاع المباشر.

الإشعاع الكلى (global radiation)

هو مجموع حزمة الإشعاع والإشعاعات المنتشرة. الذى يمكن أيضا قياسه بمقياس بيرهليوميتر.

الإشعاع (Irradiance)

ويعطى بوحدة (W / m^2) ويشير إلى معدل الطاقة الإشعاعية التي تقع على وحدة سطح منطقة. هو أيضا شدة (intensity) الإشعاع الشمسي.

الإشعاع(Irradiation)

هو كمية الطاقة التي يتم استقبالها لكل وحدة مساحة المعطى بوحدة (J / m^2)
($MJ \approx 0.28$ Kwh)

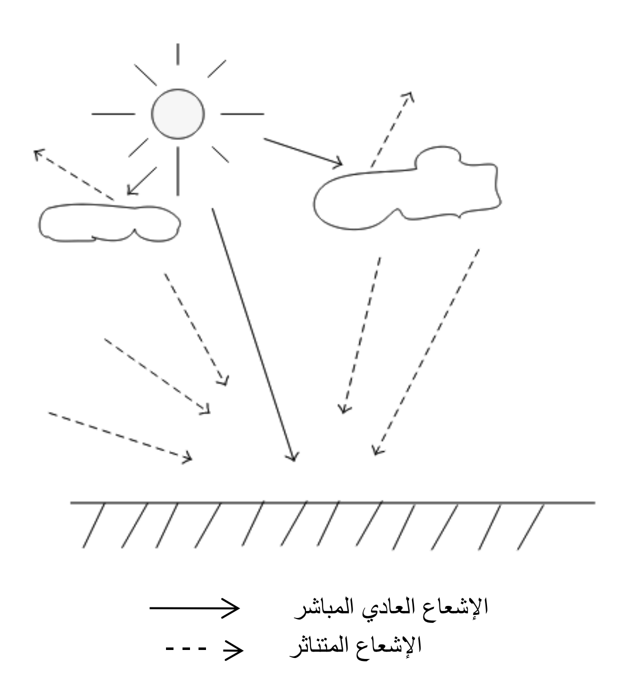
الإشعاع الشمسى (Insolation)

هو اشعاع الطاقة الشمسية.

عموما لا تتساوى شدة الإشعاع الشمسي في جميع الأماكن على كوكب الأرض. يعتمد ذلك على خط عرض المكان. وكلما ارتفع خط العرض (في نصف الكرة الشمالي)، انخفضت شدة الإشعاع الشمسي. وهذا يعتمد أيضا على الرطوبة فى المكان. عندما يكون المكان رطبا، يكون الإشعاع الشمسي أكثر تفرقا بسبب الغيوم وبالتالي شدته أقل.

إن الأماكن الأكثر ملاءمة للطاقة الشمسية المركزة في العالم تقع في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا وجنوب أفريقيا واستراليا والولايات المتحدة.

يتكون ضوء الشمس من مكونات مباشرة وأخرى غير مباشرة (متناثرة). يمثل المكون المباشر والمعروف بالإشعاع العادي المباشر (DNI or Direct Normal Irradiance) حوالى 90٪ من مجموع أشعة الشمس خلال الأيام المشمسة ولكن لا يكاد يذكر في الأيام الغائمة. يتم تركيز أشعة الشمس المباشرة باستخدام المرايا أو الأجهزة البصرية الأخرى (مثل العدسات). يوضح شكل (1) الإشعاع العادى المباشر والإشعاع المتناثر.



شكل (1) الإشعاع العادى المباشر والإشعاع المتناثر

أطلس مصر الشمسى

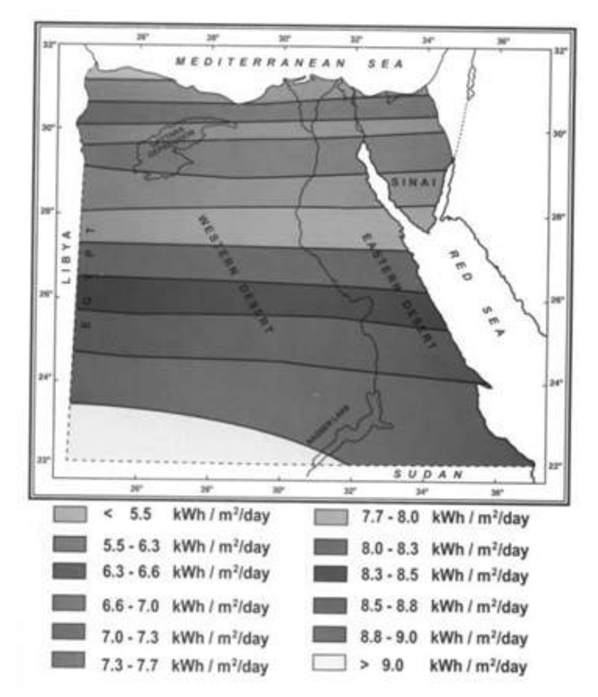
مصر إحدى دول منطقة الحزام الشمسى الأكثر مناسبة لتطبيقات الطاقة الشمسية تم إصدار أطلس شمس مصر مشتملا علي قراءات تم حصرها على مدى سنوات لجميع مناطق الجمهورية، ومتضمنا أيضا عام نمطي يتم فيه تمثيل البيانات المتوقعة لكل أيام العام مثل الإشعاع الشمسي وساعات سطوع الشمس.

تُظهر نتائج الأطلس تراوح متوسط الإشعاع الشمسي المباشر العمودي ما بين 2000 – 3200 ك.و.س/م2/السنة.

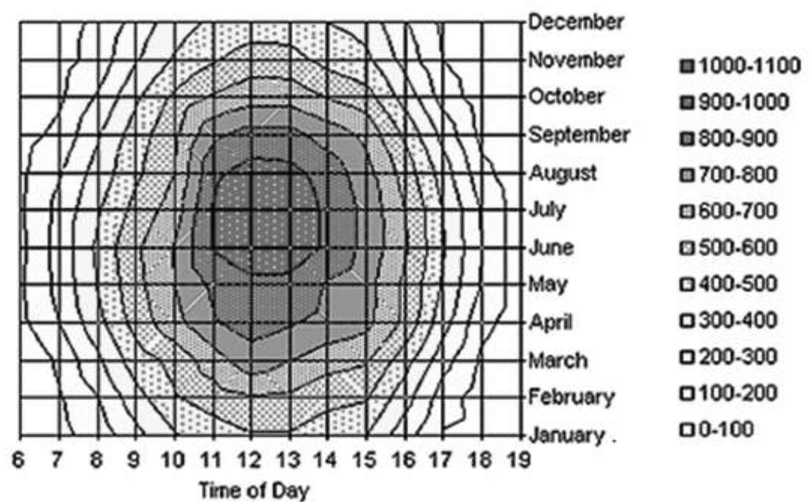
يتراوح معدل سطوع الشمس بين 9 - 11 ساعة/ يوم.

يوضح شكل (2) متوسط الإشعاع الشمسى المباشر السنوى بمصر

بينما يوضح شكل (3) الإشعاع الشمسى طبقا لليوم والشهر – القاهرة – مصر (بوحدة W/m^2).يوضح شكل (4) الإشعاع العادى المباشر فى شمال أفريقيا بوحدة kWh/m^2 per year ويوضح شكل (5) الإشعاع العادى المباشر فى العالم بوحدة kWh/m2 per year

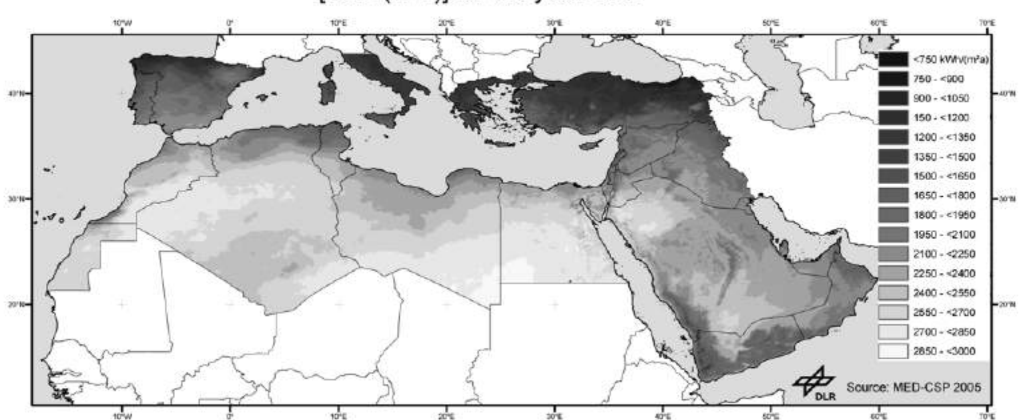


شكل (2) متوسط الإشعاع الشمسى المباشر السنوى

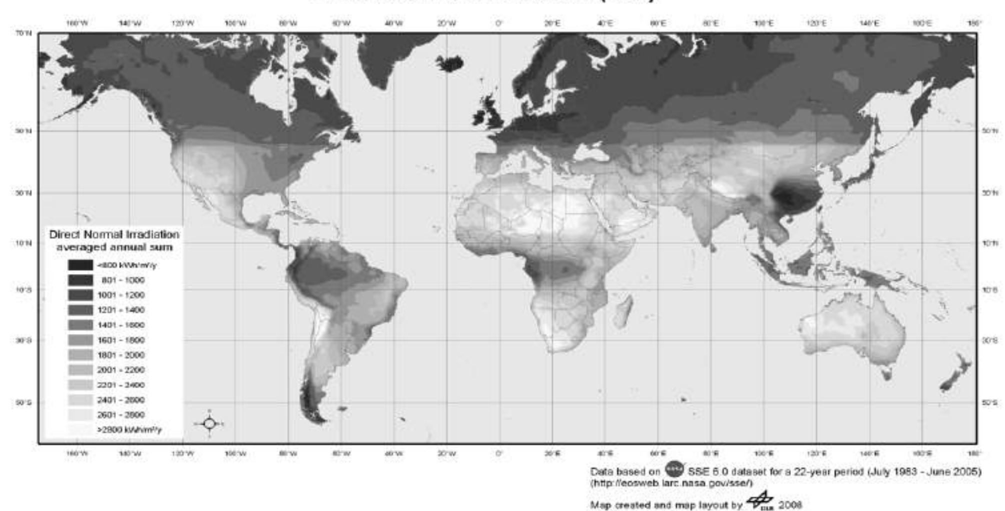


شكل (3) الإشعاع الشمسى طبقا لليوم والشهر – القاهرة – مصر

(بوحدة W/m^2)



شكل (4) الإشعاع العادى المباشر فى شمال اقريقيا بوحدة *kWh/m² per year*
(Trieb 2009)



شكل (5) الإشعاع العادى المباشر فى العالم بوحدة
kWh/m² per year

يمكن لمحطات المركزات الشمسية أن توفر طاقة فعالة من حيث التكلفة في المناطق التي لديها اشعاع شمسى مباشر أكبر من 2000 كيلووات ساعة / متر مربع في السنة، وذلك بالمناطق الواقعة عند خطوط عرض تتراوح بين ° 15 و ° 40 شمالا أو جنوب خط الاستواء. في أفضل المناطق (DNI> 2800 كيلووات ساعة / m^2 - سنة)، فإن إمكانيات توليد الطاقة الشمسية المركزة هي 100-130 جيجاوات ساعة / km^2 وهذا تقريبا يساوى نفس الطاقة الكهربائية المنتجة سنويا من محطة تعمل بالفحم بقدرة 20 ميجاوات ولها عامل سعة(capacity factor) 75%
(عامل السعة = (الحمل المتوسط/ القدرة الأسمية) * 100

الباب الثالث
تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية
Concentrating solar plant technologies

تستخدم أنظمة محطات المركزات الشمسية تركيبة من المرايات أو العدسات لتركيز حزم الأشعة الشمسية المباشرة بغرض انتاج أشكال من الطاقة المفيدة مثل الحرارة أو الكهرباء أو .... وذلك باستخدام تكنولوجيات مختلفة غالبا يستخدم التعبير (محطة المركزات الشمسية) (Concentrating solar plant) كمرادف للتعبير عن " محطة المركزات الحرارية" (Concentrating solar thermal plant) وكل منها يرمز له بالحروف (CSP) أو (CST).

نصّت وكالة الطاقة العالمية (International Energy Agency) (IEA2010) علي:

"تحتاج أنظمة CSP إلي اشعاع شمسي لكي تعمل، بأكثر دقة تحتاج إلي المركبة المباشرة للاشعاع الشمسي" (direct irradiance). من الضروري استخدام الاشعاع المباشر لأنظمة الطاقة الحرارية ذات درجات الحرارة العالية لأنها يمكن أن تتركز في مساحات صغيرة باستخدام المرايات أو العدسات ، ولذا لا يمكن استخدام المركبة المتنائرة (diffuse component). وعلي ذلك لتركيز أشعة الشمس يتطلب سماوات صافية والتي يجب أن تكون مناطق حارة وشبه جافه وبالتالي تكون هذه المناطق مناسبة لانشاء محطات (CSP).

يتراوح مستوي البداية للاشعاع العادى المباشر (Direct Normal Irradiance (DNI)) المناسب لانشاء محطات CSP من 1900 Kwh/m²/y إلي 2100 Kwh/m²/y هذا الاشعاع المرتفع يستخدم للمحطات CSP لانتاج الكهرباء من خلال تركيز طيف الطاقة الشمسية للحصول علي درجة حرارة عالية لموائع أو مواد واستخدامها لادارة ماكينات أو مولدات كهربائية.

يوضح جدول (1) مميزات وعيوب محطات المركزات الشمسية

جدول (1) مميزات وعيوب محطات المركزات الشمسية

المميزات	العيـــوب
• تستخدم مرايات غير مرتفعة التكاليف نسبيا • كفاءة جيدة • تصل إلي درجات حرارة عالية جدا • لا توجد تكاليف للوقود • القدرة متاحة 24 ساعة/ 7 ايام في الأسبوع (فى حالة وجود نظام تخزين حرارى) • غير ملوث للبيئة	• تحتاج أنظمة المركزات الشمسية تتبع(تعقب) الشمس للحفاظ علي تركيز أشعة الشمس علي المجمع • عدم القدرة علي الحصول علي طاقة في حالات الأشعة المتنائرة • تكاليف مرتفعة • تحتاج مساحات شاسعة وأماكن محددة

لماذا التركيز ؟

توجد بعض مجمعات الطاقة الشمسية لا تركز الطاقة المستقبله من الشمس، والتي تعرف بالمجمعات الثابتة (Stationary collectors) وتستخدم أساسا في تسخين المياه للأغراض المنزلية.

يكون لمجمع عدم التركيز (non-concentrated collector) عامل تركيز يساوي 1 وهذا يعني تساوي مساحة تركيز الاشعاع ومساحة مجمع الحرارة. أغلب هذا النوع يكون من نوع مجمعات الألواح المسطحة (Flat plate) . تصل درجة حرارة هذه المجمعات إلي حوالي 120° C وهي درجة حرارة غير كافية لاستخدامات انتاج الكهرباء.

لعمليات تركيز الاشعاع الشمسى العديد من الفوائد منها:

- عند تركيز الاشعاع علي المستقبل (receiver) ، تصل درجة حرارة مائع تحويل الحرارة (heat transfer fluid) (HTF) الموجود داخل المستقبل

إلي درجة حرارة عالية جدا (تصل إلي 2000° C) وبالتالي فإن كفاءة دورة الديناميكا الحرارية (Thermodynamic) تكون عالية جدا.

- تكون الأسطح العاكسة (المرايات) أبسط هيكليا وبالتالي أرخص من مجمعات الألواح المسطحة.
- تنخفض المفقودات الحرارية بوضع المستقبل داخل انشاءات مفرغة.

وعلي ذلك فإن أنظمة التركيز تستخدم أساسا الاشعاع المباشر والقليل من الاشعاع المنتشر . للحصول علي أقصي طاقة مستقبله من المجمع، تحتاج المركزات لأن تكون متتبعة (Tracking) للشمس طوال اليوم، هذا التتبع (التعقب) يسبب زيادة الاستثمارات. في النهاية يجب الاهتمام بأعمال النظافة لأسطح المركزات.

كل مجمع يتكون من جزئين:

- المركز (Concentrator) والذي يعكس أشعة الشمس الساقطة علي المجمع، هذا يزيد الطاقه المستقبله.
- المستقبل (Receiver) والذي يمرر المائع، ويستخرج الطاقة الحرارية من الاشعاع.

تصنف تكنولوجيا مجمعات المركزات الشمسية إلي:

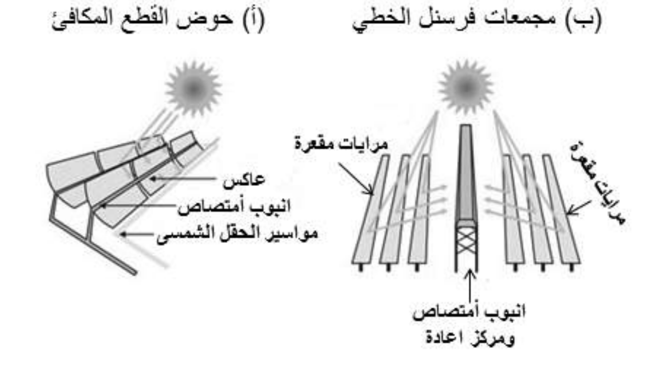
- تركيز خطي (Line focusing) والتي تعني أنها تركز الاشعاع علي أنبوبة تتبع الشمس بمحور واحد. هذا النوع هو مجمعات أحواض القطع المكافئ (Parabolic troughs)، ومجمعات فرسنل الخطي (Linear fresnel)، فى هذه الأنواع تصل درجة الحرارة بين 120° C ، 450° C
- تركيز نقطة (Point focusing) والتي تعني أنها تركز أشعة الشمس في نقطة وتحتوي علي تتبع للشمس علي محورين. هذا النوع هو الأبراج الشمسية (Solar tower) وأطباق القطع المكافئ (Parabolic dishs) في هذه الأنواع تصل درجة الحرارة إلي درجة حرارة عالية حتي 2000° C

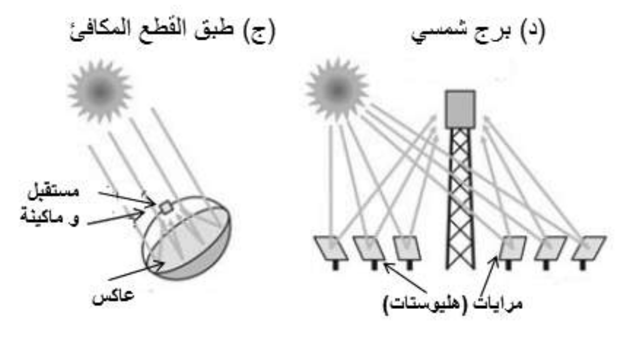
يبين شكل (1) تمثيل لأنواع محطات المركزات الشمسية طبقا لنوع التكنولوجيا.
يوضح شكل (2) أنواع محطات المركزات الشمسية طبقا لنوع التكنولوجيا.

ويوضح شكل (3) تصنيف تكنولوجيا المركزات الشمسة طبقا لدرجة الحرارة.
ينقسم التركيز في محطات CSP إلي نظامين هما:

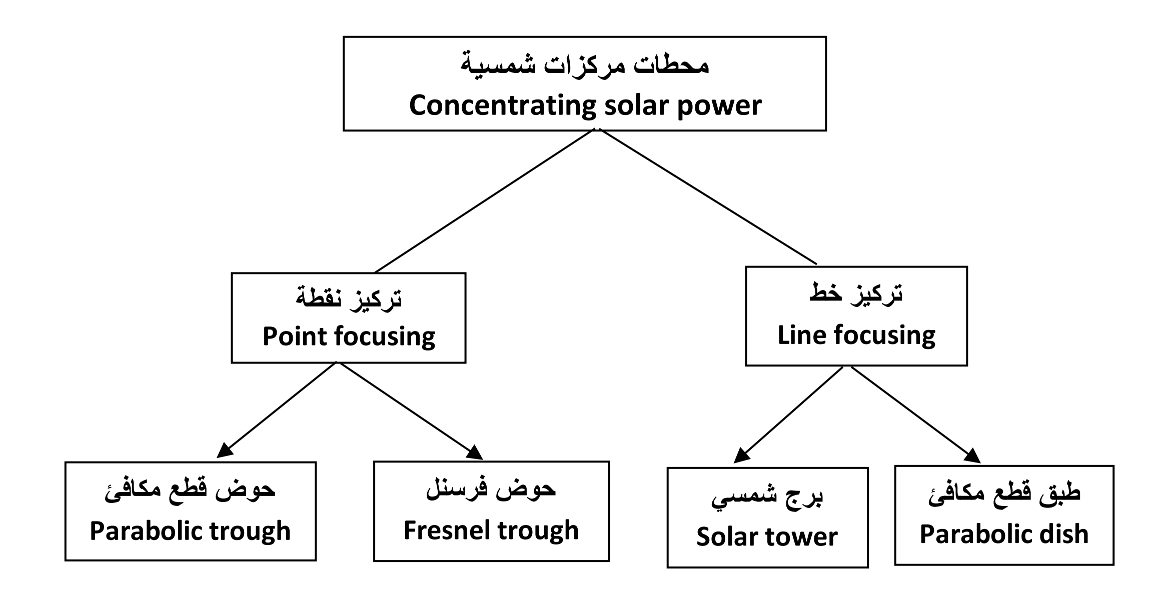
- يتعامل النظام الأول مع كيفية تركيز الاشعاع المباشر علي المستقبِل (receiver) (تركيز خط Line focus أو تركيز علي نقطة Point focus).
- يتعامل النظام الثاني مع نوع المستقبِل المستخدم (ثابت أو متحرك).

يوضح جدول (2) مصفوفة التكنولوجيات المختلفة لمحطات CSP

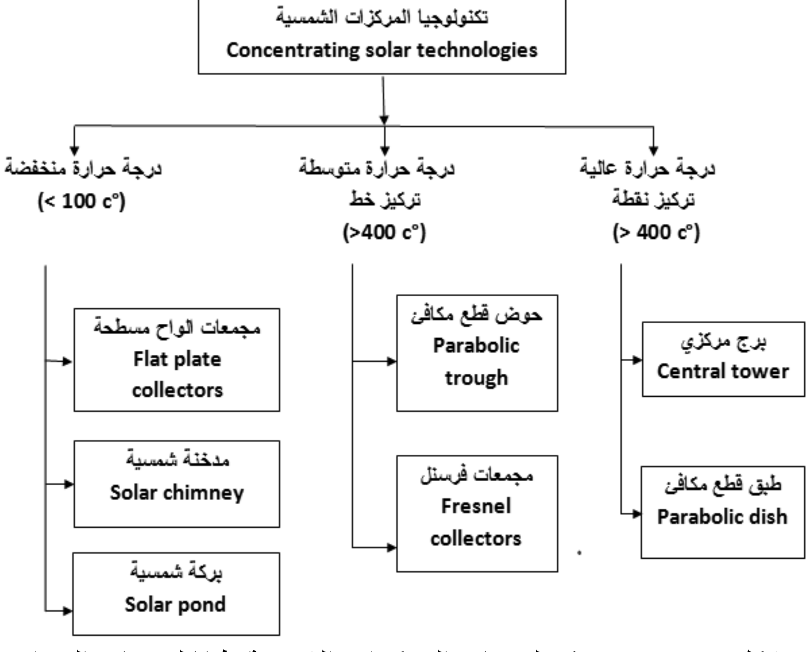




شكل (1) تمثيل لأنواع محطات المركزات الشمسية طبقا لنوع التكنولوجيا



شكل (2) أنواع محطات المركزات الشمسية طبقا لنوع التكنولوجيا



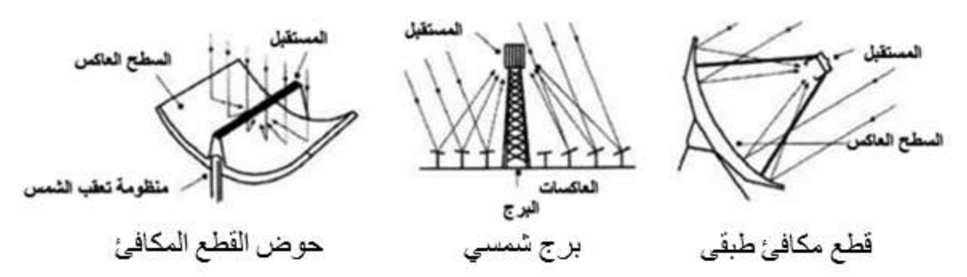
شكل (3) تصنيف تكنولوجيات المركزات الشمسية طبقا لدرجات الحرارة

جدول (2) نظام مصفوفة التكنولوجيات المختلفة لأربعة عائلات المركزات الشمسية

نوع تركيز الأشعة / نوع المستقبل		**تركيز خطي:** تتعقب المجمعات الشمس علي طول محور أحادي ويركز الاشعاع علي مستقبل خطي . هذا يجعل تعقب الشمس أسهل	**تركيز نقطة:** تتعقب المجمعات الشمس علي طول محورين ويركز الاشعاع علي مستقبل نقطة أحادية . هذا يسمح بالحصول علي درجة حرارة أعلي
ثابت	**المستقبلات الثابتة** تكون معدات مستديمة والتي تظل مستقلة عند معدات مركزات المحطة (البؤر). هذا يسهل نقل الحرارة المجمعة إلي مكونات محطة الكهرباء (power block)(PB)	عاكسات فرسنل الخطية	الأبراج
متحرك	**المستقبلات المتحركة** تتحرك مع معدات التركيز (البؤر). في كل من تصميم التركيز الخطي والتركيز النقطة فإن المستقبلات المتحركة تجمع طاقة أكثر	أحواض قطع مكافئ	أطباق قطع مكافئ

تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية

فيما يلي استعراض تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية طبقا لشكل (4):



شكل (4) تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية

1. التركيز الخطي (Line concentrated)

أ. نظام محطة أحواض القطع المكافئ (Parabolic trough power plant system)

يعتبر هذا النظام هو الأقدم في التاريخ التجاري المتاح لتكنولوجيا المركزات الشمسية. أول محطة تجارية أنشئت في صحراء موهاتي (1980s Mojava Desert) في كاليفورنيا - الولايات المتحدة الأمريكية الموضحة فى شكل (5)



شكل (5) أول محطة تجارية أنشئت في صحراء موهاتي في كاليفورنيا – الولايات المتحدة الأمريكية

البنية الأساسية لهذا النوع من المحطات الموضحة في شكل (5) عبارة عن صفوف طويلة موضوعة في محور الشمال والجنوب. هذه الصفوف تتعقب الشمس من الشرق إلي الغرب.

وتتكون مجمعات أحواض القطع المكافئ (PTCs) (Parabolic trough collectors) والموضحة فى شكل (6) من مجمعات شمسية (مرآيات)، مستقبلات حرارة (receivers) وهيكل معدني للتثبيت . تشكل المرايات ذات القطع المكافئ من ألواح من مادة عاكسة من زجاج شفاف مطلي بالفضة، هذا الزجاج المطلي يعطي العاكسات امكانية تركيز الاشعاع الشمسي إلي 80 ضعف مرة، الغرض من المرايات المصنعة على شكل قطع مكافئ هو تركيز الشمس المستقبلة من ضوء الشمس إلي انبوب استقبال مركزي عند خط محور المجمع. تكون مصفوفات المرايات حوالي 100 m طول أو اكثر ، بفتحة منحني من 5m إلي 6m

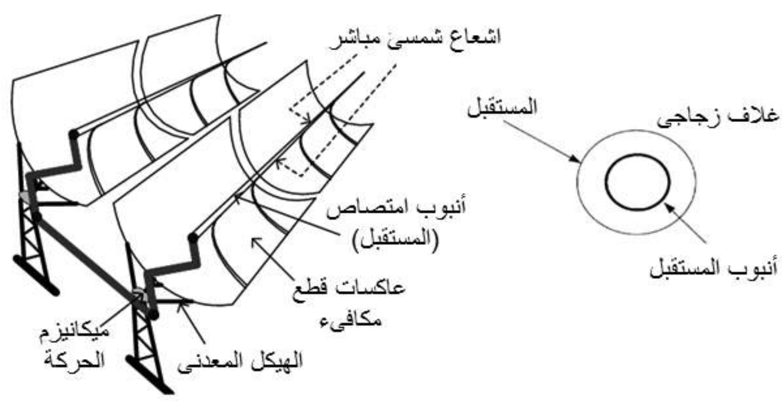
تستقبل انابيب الامتصاص الموجودة في النقط المحورية لعاكسات القطع المكافئ، الطاقة الشمسية المركزة وبالتالي تسخنها . تصنع أنابيب الامتصاص من صلب استانليس مطلي، ويختار طلاء طيفي لامتصاص الأشعة الشمسية (الموجات القصيرة) جيدا، ولكن يبعث كمية قليلة جدا من الاشعة تحت الحمراء (الموجات الطويلة). وهذا يساعد في تخفيض المفقودات الحرارية. كما تستخدام الأنابيب الزجاجية المفرغة حول أنبوب الامتصاص لتخفيض المفقودات الحرارية، يدور مائع تحويل الحرارة (heat transfer fluid(HTF)) خلال أنابيب الامتصاص لتجميع الطاقة الشمسية وتحويلها إلي بخار للمولد أو إلي نظام تخزين الحرارة. وأغلب أنواع أحواض القطع المكافئ تستخدم زيوت صناعية كمائع لتحويل الحرارة والتي تكون مستقرة عند أعلي من 400° C

تستخدم المحطات الجديدة الأملاح الذائبة عند درجة حرارة 540°C أما للتحويل إلى حرارة و/أو كوسيط لتخزين الحرارة ... تؤدي درجة الحرارة العالية للأملاح المذابة إلي تحسين أداء التخزين الحراري.

يتم ضخ المائع الساخن بطلمبة إلي مبادل حراري مركزي (heat exchanger) حيث يتم تحويل المياه إلي بخار ساخن تحت ضغط لتحريك التوربينات البخارية. ثم تستخدم التربينة البخارية، مثل أنظمة الطاقة التقليدية، لانتاج الكهرباء من المولدات.

تكون الكفاءة الكلية لهذه التكنولوجيا حوالي 15 % في المتوسط، بينما تصل إلي 28 % في الحالات المثالية.

تستخدم تركيبة ميكانيكية كمتعقب احادي المحور لتوجيه كل من المجمعات الشمسية ومستقبلات الحرارة في اتجاه الشمس. عادة تكون المجمعات مصفوفة في اتجاه الشمال - الجنوب وتتعقب الشمس عند تحركها من الشرق إلي الغرب لتجميع أقصي طاقة شمسية.



شكل (6) مكونات حوض قطع مكافى

ب. أنظمة عاكسات (أو مجمعات) فرسنل الخطية Linear Fresnel reflector(LFR) (or collector (LFC)) systems

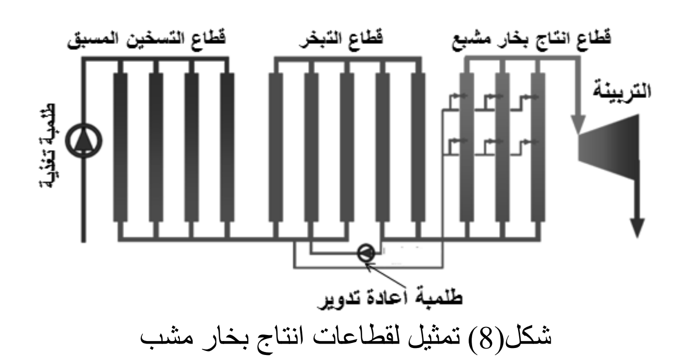
تتصف هذه الأنظمة بأنها تكنولوجيا أبسط كثير من أنظمة أحواض القطع المكافئ . يتكون النظام من مرايات صغيرة طويلة (والتي يمكن أن تكون علي شكل منحني) توضع على مستوى واحد ويمكنها أن تدور تبعا لمسار الشمس لاعادة توجية وتركيز مستمر لأشعتها إلى أنبوب المستقبل الخطى الثابت أي تعمل علي عكس الشمس علي مستقبل امتصاص أنبوبي مركب فوق صندوق المرايات. لتحسين اصطياد ضوء الشمس يتم تركيب عاكس ثاني أعلي أنابيب المستقبل بعدة أمتار والذى يعرف بالعاكس الثانوى. تتراوح متوسط درجة حرارة التشغيل للنظام بين 400°C ، 500°Cوهى أعلي من درجة حرارة تشغيل أنظمة أحواض القطع المكافئ. تستخدم

عاكسات فرسنل لانتاج البخار المباشر ولذا يفضل استخدامها فى تطبيقات البخار . يوضح شكل (7) مكونات النظام.



شكل (7) مكونات عاكسات (أو مجمعات) فرسنل الخطية

تسخن المياه من خلال ثلاثة أجزاء، كما في شكل (8)، لانتاج بخار مشبع (supersaturated steam) والذي يمكن استخدامه لانتاج الكهرباء أو البخار وحرارة العمليات، تتمثل أول مرحلة في تغذية طلمبة والتي تدفع مياه بدرجة حرارة حوالي 30 ° C إلي الجزء الخاص بالتسخين المسبق (preheating). ثم تدفع المياه مسبقة التسخين، ضعط داخلي، إلي الجزء التالي والخاص بالتبخر (evaporation) عندها يتبخر ويعاد تدويرها إلي جزء البخار وذلك لزيادة عامل التبخير (evaporation factor). اعتمادا علي عامل التبخير فإن البخار عندئذ يحقن في جزء التحميص (super heating) بينما ينتج البخار المشبع والذي يستخدم في العمليات الصناعية المختلفة أو في انتاج الكهرباء من خلال التربينات البخارية.



شكل(8) تمثيل لقطاعات انتاج بخار مشب

من المميزات الرئيسية لعاكسات فرسنل (LFCs) مقارنة بحوض القطع المكافئ (PTCs):

1. يستخدم LFCs مرايات زجاجية مسطحة رخيصة الثمن والتي تعتبر سلعة قياسية منتجة بكثرة.
2. تحتاج LFCs لصلب وخرسانة أقل، لأن هيكل التثبيت المعدني يكون أخف وزنا، بالاضافة إلي سهولة التجميع.
3. أحمال الرياح علي LFCs تكون أقل، والنتيجة استقرار أفضل للهيكل، وتخفيض المفقودات البصرية (الطيف)، وقلة زجاج المرايات الهالك.
4. مساحة المرايات لكل مستقبل تكون أكبر في حالة LFCs عن PTCs، وهذا هام جدا لأن المستقبل هو أغلي مكون لكل من PTC ، LFCs
5. أسهل فى عمليات التنظيف.

تحتاج هذه المميزات إلي توازن لأن الكفاءة البصرية (Optical efficiency) لمجال الشمس للمجمع LFC (بالنسبة إلي اشعاع الشمس المباشر علي فتحات المرايات المتراكمة) تكون أقل من المجال الشمسي للمجمع PTC نتيجة الخصائص الهندسية للمجمع LFC.

المشكلة أن المستقبل يكون ثابت بالاضافة إلى أن مفقودات القدرة في الصباح والمساء تكون مرتفعة مقارنة بالمستقبل PTC . علي الرغم من هذه العيوب، فإن البساطة النسبية لنظام LFC يعني أنه أرخص في التصنيع والانشاء عن نظام PTC.

وعلي ذلك تظل التكلفة لكل ك.و.س أقل. بالاضافة إلي ذلك، عموما فإن LFCs يقترح استخدام انتاج بخار مباشر، مع اضافة تخزين الطاقه الحرارية والتي تكون أكثر تكلفة.

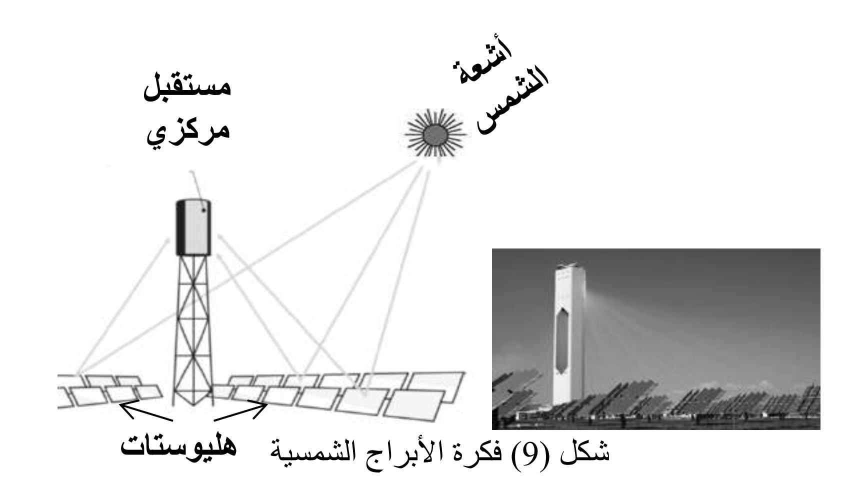
2. تركيز نقطة (Point concentrated)

أ. الأبراج الشمسية (Solar towers)

تعتبر الأبراج الشمسية جزء من أنظمة المستقبلات الثابتة ، ولها في هذا المجال أكبر الفوائد لأن لها القدرة علي انتاج بخار مشبع (Supersaturated) بدرجة حرارة أعلي من 700°C وحتي 1000°C ، تعمل درجات الحرارة العالية علي

الحصول علي كفاءات أعلي مع تربينات البخار وبالتالي كفاءة كلية عالية لمحطة القوي.
للأبراج الشمسية ذات نسبة تركيز600-fold تكون الكفاءة الاجمالية (Overall efficiency) بين35% & 20%

تعمل أبراج الحرارة الشمسية بآلاف المرايات، والتي تعرف بالهليوستات (Heliostats) (أدوات ذات مرآه تعكس الشمس في اتجاه واحد). هذه الهليوستات تعمل لحظيا كعاكسات مسطحة والتي تكون مركبة علي نظام محور مزدوج و تعكس الاشعاع الشمسي علي نقطة واحدة في البرج العالي. ويمكن أن تعمل الأبراج الشمسية مع نوع معين من مائع التسخين، وتكون أنظمة الهواء والأملاح المذابة مناسبة أكثر لهذه التقنية، لأن هذا لا يستدعي الاحتياج إلي مبادلات حرارية اضافية والتي تؤدي إلي انخفاض الكفاءة يوضح شكل (9) فكرة الأبراج الشمسية.



شكل (9) فكرة الأبراج الشمسية

ب. **طبق ستيرلنج قطع مكافئ (Dish parabolic - stirling power plant)**

يستخدم في هذا النظام تكنولوجيا ستيرلنج القطع المكافئ والتي تنتج الكهرباء مباشرة بالتوافق مع ماكينة ستيرلنج (stirling engine). مقارنة بالأنظمة الأخري، فإن الكفاءة الكلية للنظام تكون كبيرة حوالي من 20% الي 30% (اشعاع

شمسي إلي كهرباء). كذلك يحتاج هذا النظام إلي مساحة أرض أصغر مقارنة بالتكنولوجيات الشمسية الأخري (البرج وحوض القطع المكافئ).

يكون المجمع علي شكل طبق قطع مكافئ ، وينعكس الاشعاع علي مستقبل موضوع في نقطة مركز (بؤرة) الطبق ، يجهز الطبق بنظام تتبع (تعقب) شمسي علي محورين للتأكد من الحصول علي أفضل اشعاع للمرايات ، دائما يواجه الطبق جهة الشمس . وله نسبة تركيز (concentartion ratio) يمكن أن تصل إلي 2000، وعادة يكون عرض الأطباق بين 5m، 15m

لا يحتاج هذا النوع إلي تخزين طاقة حرارية أو احتمال نقل طاقة حرارية، لأن الطاقه تتحول مباشرة إلي كهرباء.

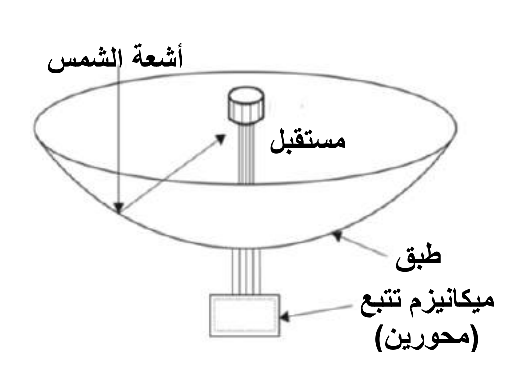
فكرة أساس عمل تكنولوجيا ستيرلنج قطع مكافئ: تعكس مرايات القطع المكافئ أشعة الشمس مباشرة علي مستقبل متحرك (ماكينة ستيرلنج) والقريب من مرايا القطع المكافئ شكل (10) فكرة طبق ستيرلنج قطع مكافئ.

تسخن العاكسات مائع التسخين (إما هيدروجين أو هليم) في ماكينة ستيرلنج حتي درجة حرارة 750° C بعض الأنواع تصل إلي 1500° C وضغط 150 Bar. يتم تحويل الحرارة إلي كهرباء عن طريق مولد ستيرلنج أو مولد صغير آخر.

من المميزات الأساسية لتكنولوجبا ستيرلنج قطع مكافئ تحويل الحرارة مباشرة إلي ماكينة ستيرلنج ، والحجم الصغير للنظام له القدرة علي التطبيقات الصغيرة لانتاج الطاقة غير مركزية والبعيدة عن الشبكة.

حدود قدرة محطات ستيرلنج القطع المكافئ بين 10 KWel, 50 KWel، وبالتالي يسمح ذلك بأن تكون تكاليف الانتاج منخفضة.

من العيوب الرئيسية لهذه التكنولوجيا الاحتياج إلي عاكس هندسي (reflector geometry) معقد وبالتالي تكلفة تصنيع مرتفعة ، وكذلك صيانة خاصة بمهارة لأن كل طبق يشمل علي مولد وماكينة خاصه به.





شكل (10) فكرة طبق ستيرلنج قطع مكافئ

يوضح جدول (3) مقارنة بين تكنولوجيات CSP.

ويوضح جدول (4) خصائص CSP المنتجة تجاريا:

- حوض قطع مكافئ Parabolic trough.
- مجمع فرسنل الخطي Linear Fresnel.
- الأبراج الشمسية Solar Towers.
- طبق قطع مكافي Parabolic dish.

جدول (3) مقارنة بين تكنولوجيات CSP

البند	الأبراج الشمسية Solar Towers	حوض قطع مكافئ Parabolic trough	طبق قطع مكافي Parabolic dish	مجمع فرسنل الخطي Linear Fresnel
الاستخدام	المشاريع الكبيرة المتصلة بالشبكة بسعة MW 200-30	المشاريع الكبيرةالمتصلة بالشبكة بسعة MW 200-30	التطبيقات الفردية او مجموعات في المزارع	التطبيقات الفردية
التكاليف (دولار/وات)	4.4 – 2.5	4 – 2.7	12.6 – 1.3	غير متوفر
محور التتبع	محورمزدوج	محور أحادي أومزدوج	محور مزدوج	محور مزدوج
مبادل حراري	يحتاج	يحتاج	لا يحتاج	لا يحتاج
نوع التركيز (في حالة الصفوف المتوازية)	تركيز نقطة	تركيز خط	تركيز نقطة	تركيز خط
نوع المستقبل	ثابت	متحرك (متنقل)	متحرك	ثابت
المميزات	لأن الأملاح الموجودة المرغوبة أقل فإن درجة حرارة التشغيل تكون أعلى مقارنة ب"حوض القطع المكافئ"	ضوء الشمس مركزي للحصول على كفاءة جيدة للمستقبل	يمكن تركيبها في اي قطعة أرض (تضاريس) باستخدام كميات قليلة من المياة	لا تحتاج ربط دوار بين المستقبلات و مواسير الموقع الرئيسية ، و بالتالي تجهز تصميم اضافي مرن
العيوب	كل مرآة يجب ان تشتمل على تحكم محوري مزدوج	تغلف أنابيب المستقبل بأنابيب زجاج شفاف لتخفيض الفقد الحراري	يحتاج التحويل من الحرارة إلى الكهرباء إلى آلة ثقيلة ، و التي تحتاج إلى نظام تعقب	تحتاج إلى مرآة أعلى المستقبل(الثانوى) لاعادة بؤر الأشعة الضائعة أو مستقبل متعدد الأنابيب و الذي يكون كبير كفاية لالتقاط الأشعة الضائعة بدون مرآة

جدول (4) خصائص CSP المنتجة تجاريا

حوض قطع مكافىء Parabolic trough	برج مركزي Central tower	طبق ستيرلنج Dish stirling	مجمع فرسنل Collector Fresnel
درجة الحرارة: 400˚C	درجة الحرارة: 600 - 800 ˚C	درجة الحرارة: 700- 800 ˚C	درجة الحرارة:400˚C
تركيز خط	تركيز نقطة	تركيز نقطة	تركيز خط
أنبوب استقبال خطى	مستقبل مركزي	متتبع محور مزدوج	مستقبل خطي
تستهلك مياه	يستهلك مياه	لا يحتاج مياه	---------
التركيز : مرايات قطع مكافئ	مرايات تركيز مسطحة	تركيز طبق	- صف مستقبل ثابت مع مرايات - مرايات مركزية مسطحة او منحنية
يمكن تخزين الحرارة	مقدرة تخزين الحرارة	صعوبة تخزين الحرارة	---------
الأكثرانتشارا تجاريا	معتمد تجاريا	تجاريا تحت التطوير	تجاريا تحت التطوير
جيد لاختيارت التهجين (المزج)	أداء جيد للسعات الكبيرة و درجات الحرارة	وحدات 25 KW	5 MW تشغيل
يحتاج أرض مسطحة	يمكن الانشاء على موقع غير مسطح	---------	إنشاءات أقل
كفاءة جيدة للمستقبل و لكن كفاءة منخفضة للتربينة	كفاءة منخفضة للمستقبل و لكن كفاءة عالية للتربينة	كفاءة عالية 30%	---------
---------	---------	تبريد جاف	--------
---------	---------	ماكينة ستيرلنج	--------

الباب الرابع
مائع نقل الحرارة
(Types of heat transfer fluid (HTF))

يعرف انتقال الحرارة (heat transfer) أنه طاقة منتقلة نتيجة للفرق في درجات الحرارة. فأينما يظهر فرق في درجات الحرارة في وسط معين أو بين وسطين عندئذ تظهر ظاهرة انتقال للحرارة.

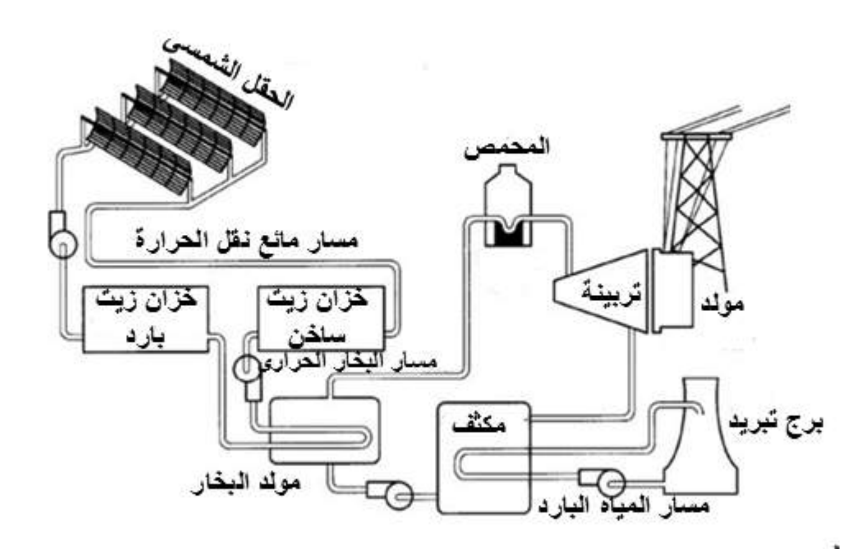
إن انتقال الحرارة هو انتقال الطاقة الحرارية من الكتلة الأسخن إلى الكتلة الأبرد. عندما يكون لجسم ما درجة حرارة مختلفة عما يحيط به من الأجسام، فإن انتقال الطاقة الحرارية (تعرف أيضا بالتدفق الحراري أو التبادل الحراري)، يحدث بحيث تصل الأجسام إلى توازن حراري، وهذا يعني أنها ذات درجة حرارة واحدة. ويحدث الانتقال الحراري دائما من الأجسام الأسخن إلى الأجسام الأبرد، وهذا ما يؤكده القانون الثاني للديناميكا الحرارية: إن انتقال الحرارة بين الأجسام القريبة لا يمكن أيقافه، ولكن يمكن إبطاؤه. تنتقل الحرارة بثلاثة طرق هي: التوصيل، والحمل، والإشعاع.

إن انتقال الطاقة بواسطة التوصيل أو الحمل يحتاج إلى وجود وسط مادي بينما الانتقال عن طريق الاشعاع لا يحتاج ذلك وأن الانتقال بالاشعاع يظهر بكفاءة أكبر في الفراغ ’ فيما يلى تعريف طرق انتقال الحرارة:

- التوصيل (conduction): وتنتقل الحرارة بالتوصيل من جسم إلي آخر بواسطة الإتصال المباشر أو التصادم العشوائي بدون أي حركة لكتلة المادة وإنتقال الحرارة وقد يكون توصيلا مستقرا أى بمعدل ثابت أو غير مستقر بمعدل متغير.
- الحمل (convection) : يحدث هذا النوع من انتقال الحرارة فى الموائع (السوائل والغازات) وذلك أثناء سريانها داخل أو خارج المواسير أو سريانها على الأسطح الساخنة أو الباردة، ويتم إنتقال الحرارة بالحمل نتيجة لحركة جزئيات المائع و هى محملة بالحرارة حيث تصطدم مع جزئيات أخري أقل منها فى درجة الحرارة وبالتالي تكسبها جزء من حرارتها، ويلاحظ أن انتقال الحرارة بالتوصيل أسرع من انتقال الحرارة بالحمل، هذا ويكون إما حملا حرا أو حملا جبريا.

- الإشعاع (radiation) :هو انتقال للموجات الكهرومغناطيسية من مصدر مشع إلي آخر خلال الفراغ الذي قد يكون أو لا يكون مشغولا بالمادة.

إن مائع نقل الحرارة، هو أحد المكونات الاساسية لتخزين ونقل الطاقة الحرارية في أنظمة مركزات الطاقة الشمسية. يوجد أنواع مختلفة من موائع نقل الحرارة مثل الهواء والماء / البخار والزيوت الحرارية (thermal oils) والسوائل العضوية (organic fluids) والأملاح المنصهرة (molten-salts) والمعادن السائلة (liquid metals), والتى تختلف خصائصها مثل درجة حرارة الانصهار (melting temperature) الثبات الحراري - (thermal stability) – التآكل(corrosion) . وتكون الأنابيب والمواد الحاوية لمائع نقل الحرارة من الفولاذ المقاوم للصدأ و سبائك النيكل. يوضح شكل (1) مسار مائع نقل الحرارة بنظام مركزات الطاقة الشمسية



شكل (1) مسار مائع نقل الحرارة بنظام مركزات الطاقة الشمسية

أنواع مائع نقل الحرارة ((Types of heat transfer fluid (HTF)):

1. زيوت حرارية اصطناعية (Synthetic thermo oil)

وللتبسيط تسمي زيوت حرارية (thermo oil)

هذا المائع مستخدم في جميع أنظمة المركزات الشمسية البخارية منذ أكثر من 25 سنة بمحطات حوض القطع المكافئ.

هذه الزيوت عبارة عن خليط أصهري (eutectic mixture) (أحيانا يطلق عليه يوتكتى) (هو مخلوط من مادتين أو أكثر له نقطة انصهار اقل من نقطة انصهار أي مخلوط آخر منهما، وقد تسلك اليوتكتيات من بعض الوجوه مسلك المركب الحقيقي) من ثنائي أكسيد الفينيل (biphenyl / biphenyl / oxide).

من الأنواع شائعة الإستخدام: (Therminal VP- 1) & (Dowtherm A)

يوضح جدول (1) مميزات وعيوب الزيوت الحرارية.

جدول (1) مميزات وعيوب الزيوت الحرارية

المميزات	العيـــوب
• درجة حرارة تجمد منخفضة (حوالي من 12°C الي 20° C) • استقرار حراري عالي في حدود درجات حرارة التشغيل • لزوجة منخفضة (تحسين النقل الحراري - انخفاض مشاكل الضخ وبداية التشغيل) • عدم التآكل (من غير المرغوب استخدام سبائك خاصة أو ستنلس ستيل)	• درجات حرارة قصوي محدودة (حوالي 400° C تسبب مشاكل في التحلل الحراري) • مشاكل الوميض • مشاكل السموم • العمل تحت ضغط (حوالي 25 الي 35 بار) لتجنب التبخر عند درجات حرارة التشغيل • تكاليف مرتفعة (حوالي 4 الي 7 يورو/كجم) • أقل صداقة للبيئة مقارنة بالأوساط الأخري ، التسريب لا يسبب مشكلة عند تشغيل المحطه ولكن يؤثر بيئيا.

.2 الزيوت المعدنية (Mineral oil)

استخدمت هذه الزيوت عند انشاء أول محطة مركزات شمسية حرارية عام 1985

يوضح جدول (2) مميزات وعيوب الزيوت المعدنية.

جدول (2) مميزات وعيوب الزيوت المعدنية

المميزات	العيوب
▪ في حالة وجود نظام تخزين مباشر ، أي أن نظام التخزين يستخدم HTF مباشر كوسط تخزين، لأن الزيوت المعدنية تمتاز بأنها وسط تخزين حراري جيد.	▪ عند درجة حرارة أعلي من 500° C يصبح غير مستقر.

.3 الأملاح الذائبة (Molten salts)

توجد أنواع مختلفة من خليط الأملاح الذائبة مثل:

- خليط ثنائي (brimary mixtures).

  أملاح شمسية (solar salts):

  نترات صوديوم % m/m : 60% Na NO3

  نترات بوتاسيوم 40% K NO3

- خليط ثلاثي (ternary mixture)

  ملح غير عضوي (الاسم التجاري Hitec)

  نترات صوديوم % m/m : 7% Na NO3

  نترات بوتاسيوم 53% K NO3

  نترات صوديوم 40% Na NO2

- ملح خليط النترات الثلاثي (الاسم التجاريHitec XL)

  نترات صوديوم % m/m : 7% Na NO3

نترات بوتاسيوم 45% K NO3
نترات كالسيوم 48% Ca (NO3)2

الكسر الكتلى wi (mass fraction):

فى الكيمياء، هو عبارة عن نسبة كتلة مادة ما mi إلى كتلة المزيج الكلى mtot أى ان wi= mi / mtot ويرمز له بـ m/m %

هذا يعنى أن الكسر الكتلى يستخدم فى تقنية تحليل العناصر للاشارة إلى نسبة كتلة أحد العناصر إلى الكتلة الكلية

يوضح جدول (3) مميزات وعيوب الأملاح الذائبة

ويوضح جدول (4) خصائص أنواع الأملاح الذائبة

جدول (3) مميزات وعيوب الأملاح الذائبة

المميزات	العيوب
▪ أقصي درجات حرارة (حتي 600° C) ▪ عدم وجود مشاكل للوميض ▪ لا توجد مشاكل سموم ▪ ضبط تشغيل منخفض (حوالي 1 الي 10 بار) ▪ تكاليف منخفضة (حوالي 0.5 الي 2 يورو/كجم)	▪ درجة تجمد مرتفعة (صعوبة التحكم ليلا، مثلا التسخين الكهربي للأنابيب، أو دوران المائع الساخن)

جدول (4) خصائص أنواع الأملاح الذائبة

الخصائص	أملاح شمسية (solar salt)	ملح غير عضوي (Hitec)	ملح خليط النترات الثلاثي (Hitec XL)
أقصي درجة حرارة ° C	600	535	500
نقطة تجميد ° C	238	142	120
الكثافة عند 300° C (kg/m3)	1899	1640	1992
*اللزوجة عند 300° C (cp)	3.26	3.16	6.37
السعة الحرارية عند 300° C (kj/kg)	1495	1560	1447

*اللزوجة هي مقاومة مائع ما للجريان، ومقدار مقاومته لضغط يجبره على التحرك والسيولة. كلما زادت لزوجة مائع ما، قلّت قابليته للجريان.
البواز (Poise) (P)عبارة عن وحدة غير نظامية لقياس اللزوجة الحركية، سميت نسبة للفيزيائي الفرنسي جان لويس ماري بوازييه (Jean Louis Marie Poiseuille)
جزء واحد من مئة جزء من البواز يسمى سنتيبواز، وذلك بإضافة السابقة *سنتي*.
1 سنتيبواز يعادل 1 ميللي باسكال.ثانية ($cP = 10^{-2}P = 10^{-3}$ Pa·s)

4. البخار / المياه (Steam / Water):

يستخدم كمائع نقل الحرارة ومائع تشغيل في دوره مجموعة القوي
يوضح جدول (5) مميزات وعيوب البخار / المياه

جدول (5) مميزات وعيوب البخار / المياه

المميزات	العيوب
▪ عدم وجود مشاكل التجمد ▪ عدم وجود مشاكل الوميض ▪ عدم وجود مشاكل التاكل ▪ لا توجد تكاليف جوهرية	▪ ضغوط مرتفعة داخل انبوب الممتص (حوالي 100 بار) ▪ صعوبة التحكم في درجة الحرارة علي طول الأنبوب

يوضح جدول (6) خصائص أنواع مائع نقل الحرارة الآتية:

- زيت معدني
- زيت اصطناعي
- زيت سيليكون
- أملاح نترات
- أملاح كربونية
- صوديوم (سائل)

جدول (6) خصائص مائع نقل الحرارة

نوع الوسط	أقصي درجة حرارة (° C)	السعة الحرارية (Cp) (J/Kg . k)	الموصولية الحرارية (K) (w/m.k)
زيت معدني (mineral oil)	300	2600	0.12
زيت اصطناعي (synthetic oil)	400	2300	0.11
زيت سيليكون (silicon oil)	400	2100	0.10
أملاح نترات (Nitride salt)	450	1500	0.50
أملاح نترات (Nitride salt)	565	1600	0.50
أملاح كربونية (carbonate salt)	850	1800	2.0
صوديوم (سائل) (sodium)	850	1300	71.0

حيث

Cp = specific heat at constant pressure

K = thermal conductivity (heat conductivity)

- الحرارة النوعية (specific heat)

هي كمية الحرارة اللازمة لتغيير حالة 1 كيلوجرام من المادة من حالة إلى أخرى دون تغيير في درجة الحرارة (مثل تحول الماء إلى بخار). ... وعند تحول المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة تفقد المادة حرارة الانصهار وتصبح مادة صلبة.

- الموصولية الحرارية (thermal conductivity)

في الفيزياء والكيمياء هي خاصية المادة التي تشير إلى قابلية المادة لنقل الحرارة.

تقاس الموصولية الحرارية لمادة ما بوحدة وات/متر/كلفن.

وتختلف الموصولية الحرارية من مادة إلى مادة فالمعادن عموما تكون جيدة الناقلية الحرارية مثل النحاس والحديد والفضة، أما الأخشاب و البلاستيك مثلا، فهي ضعيفة التوصيل الحراري.

الباب الخامس
أنظمة تخزين الطاقة الحرارية
Thermal energy storage systems (TES)

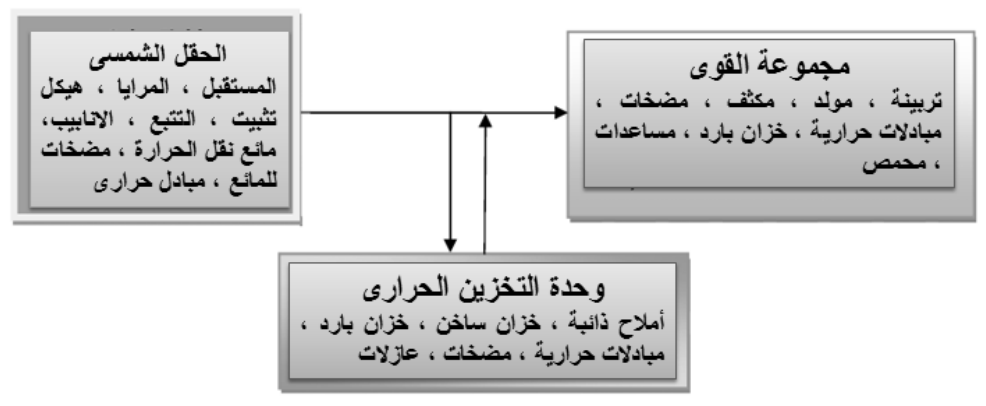
سبق توضيح أن تكنولوجيا تركيز الطاقة الشمسية تستخدم المرايا لتعكس وتركز أشعة الشمس نحو مستقبل يقوم بتجميع هذه الطاقة وتحويلها إلى حرارة و التى يمكن استخدامها لانتاج الكهرباء عن طريق التوربينات البخارية والمولدات الكهربائية. على الرغم أن الطاقة الشمسية تصنف من بين الطاقات الواعدة، إلا أنها تواجه عدة تحديات منها أن إنتاج الطاقة يكون متقطع عندما تغرب الشمس أو عند وجود الغيوم.

يعتبر التخزين الحراري من أنجح الطرق للتصدي لهذا التحدي حيث يساعد فى الاستخدام الفعال للطاقة وتوفيرها كما أن هناك اختلاف بين نسبة الطاقة المولدة والمستهلكة.

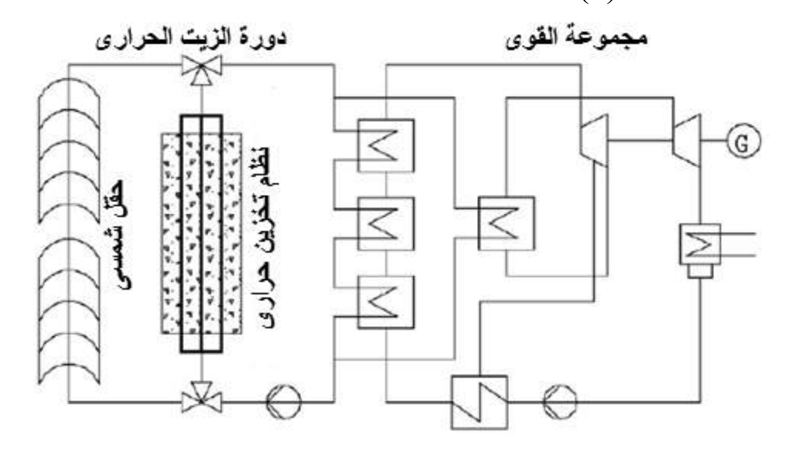
من تقنيات التخزين الحراري، تخزين الحرارة الكامنة والتى تستخدم مواد تغير حالتها الفيزيائية بفعل الحرارة. إذ أن هذه المواد لها خاصية تخزين الطاقة فى شكل حرارة كامنة، هذه الحرارة يجري تخزينها أو استخدامها أثناء الانتقال من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة أو العاكس. فهى تعتمد على تطبيق مبدأ فيزيائى بسيط، إذ تتميز كل مادة بدرجة حرارة انصهار معينة فتتحول إلى حالتها السائلة عن طريق امتصاص الحرارة من الجو المحيط وتستعيد حالتها الصلبة عند انخفاض درجة الحرارة. وترتبط هذه الخاصية بالطاقة الحجمية الممنوحة عند انصهار المادة، إذ كلما كانت كبيرة كلما كانت خصائص تخزين / استعادة الحرارة مثيرة للاهتمام. يمكن تصنيف هذه المواد وفقا لطبيعتها الكيميائية فى ثلاث فئات كبيرة: مواد عضوية ، مواد غير عضوية و مواد سهلة الانصهار.
كمثال لمادة غير عضوية تدخل ضمن الأملاح الرطبة: نترات الصوديوم.
تعتمد تكنولوجيا المحطات الحرارية بالمركزات الشمسية (CSP) علي الاشعاع الشمسي المركز .من فوائد CSP مقارنة بالمحطات الفوتوفلتية PV ان الاشعاع الشمسي لا يتحول مباشرة الى طاقة كهربائية ولكن يتحول إلي حرارة ثم ينتج بخار من هذه الحرارة. يلي ذلك مرحلة امكانية تخزين الحرارة للحفاظ علي انتاج طاقه ثابتة.
يوضح شكل (1) المكونات الرئيسية لمحطة مركزات شمسية، للتخزين الحراري عدة

تطبيقات مختلفة في محطة CSP، من أهم تطبيقات التخزين الحراري أنه يتجاوز حالة وجود سحب، غمام أو ظلام وعمل المحطة لفترات طويلة وقت الغروب. يوضح شكل (2) تمثيل لمكونات محطة شمسية ديناميكا حرارية، وموضع التخزين الحرارى بها.

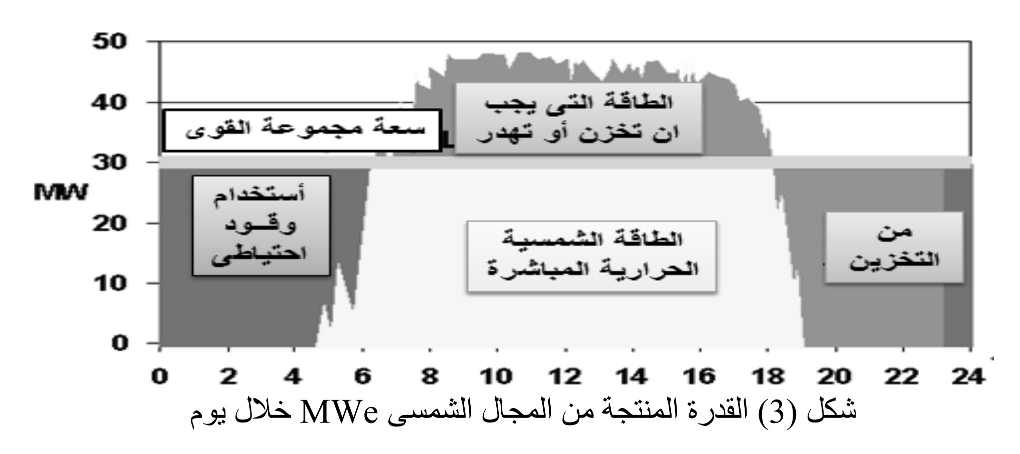
يوضح شكل (3) تمثيل للقدرة المنتجة من المجال الشمسى MWe خلال يوم لمحطة مركزات شمسية، يلاحظ أن أقصى طاقة كهرباء حرارية منتجة من الحقل الشمسى أكبر من المقنن الحرارى لمجموعة القوى، هذه الزيادة تخزن فى حالة وجود نظام تخزين أو تهدر فى حالة عدم وجود نظام تخزين.



شكل (1) المكونات الرئيسية لمحطة مركزات شمسية



شكل (2) تمثيل لمكونات محطة شمسية ديناميكا حرارية



شكل (3) القدرة المنتجة من المجال الشمسى MWe خلال يوم

يوضح جدول (1) أنظمة تخزين الطاقة الحرارية، ونلاحظ التوليفة بين نوع المجمع وضغط التشغيل ، وحدود درجة حرارة التشغيل، والتي تختلف من 260° C لنظام برج بخار مشبع عند 40 bar ضغط ، إلي 1000 °C في نظام هواء المجمع برج وضغط 1 bar

تصنف تكنولوجيات خزانات الطاقة الحرارية إلي :

- نظام تخزين طاقة حرارية فعال مباشر (direct active) والذي فيه يكون مائع التحويل الحراري (HTF) هو وسط التخزين (شكل (4))
- نظام تخزين طاقه حرارية سلبي (passive)، والذي لا يكون فيه مائع التحويل الحراري (HTF) هو وسط التخزين، حيث تستخدم مادة أخري في هذا النظام (شكل(5))

عادة يستخدم البخاركمائع تحويل الحرارة في أنظمة مجمعات أحواض القطع المكافىء والأبراج. في أغلب الأنواع يستخدم مركم البخار (steam accumulator)، تكون الفكرة تخزين كميات قليلة من البخار للحفاظ علي استقرار الشبكة الكهربائي.

جدول (1) أنظمة تخزين الطاقة الحرارية

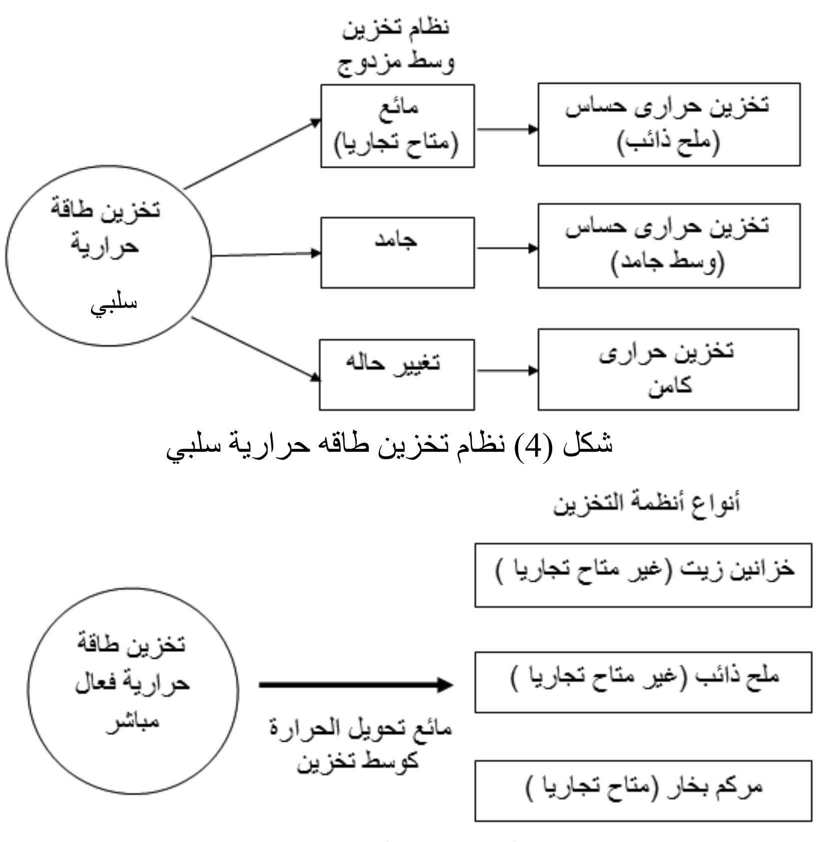
نوع مائع التحويل الحراري	نوع المجمع	ضغط التشغيل (Bar)	درجة حرارة التشغيل (° C)	مجموعة القوى (PB)
زيوت صناعية	حوض قطع مكافيء	15	400	دورة رانكن العضوية (ORC)*
بخار مشبع	برج	40	260	تربينة بخارية
بخار محمص	برج	50-100	400-500	تربينة غازية
ملح ذائب	حوض/برج	1	500-600	دورة مركبة
هواء	برج	1	700-1000	ماكينة سترلينج**
هواء	برج	15	800-900	أخري

* دورة رانكن العضوية Organic Rankine Cycle (ORC)

هي دورة وظيفتها تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل. تغذى الحرارة من مصدر خارجي إلى حلقة مغلقة، والتي عادة ما تستخدم الماء. تولد هذه الدورة حوالى 80% من الطاقة الكهربائية حول العالم، بما في ذلك جميع منشآت الطاقة الشمسية الحرارية، الطاقة الحيوية، طاقة وقود أحفوري، و الطاقة النووية. يعود اسمها إلى العلامة الاسكوتلاندي، ويليام رانكن. تعد دورة رانكن اللبنة الأساسية في الديناميكا الحرارية المتعلقة بالمحرك البخاري.

** ماكينة ستيرلينج (Stirling engines)

يعرف أيضاً بـمُحرّك الهواء الساخن، محرك سترلينج هو محرك حراري، يعمل بواسطة ضغط وتمدد الهواء أو غاز آخر، عند درجات حرارة مختلفة. وبشكل آخر هو تحويل الطاقه الحرارية لشغل ميكانيكي- بذل جهد، وتعريفه بشكل محدد أكثر هو دائرة مغلقة ذات محرك حراري يعمل بشكل مستمر بواسطة جهد الغازات التي تنضغط وتتمدد بشكل مستمر ..صمم محرك ستيرلنج في عام 1816 بواسطة روبرت ستيرلينج



شكل (4) نظام تخزين طاقه حرارية سلبي

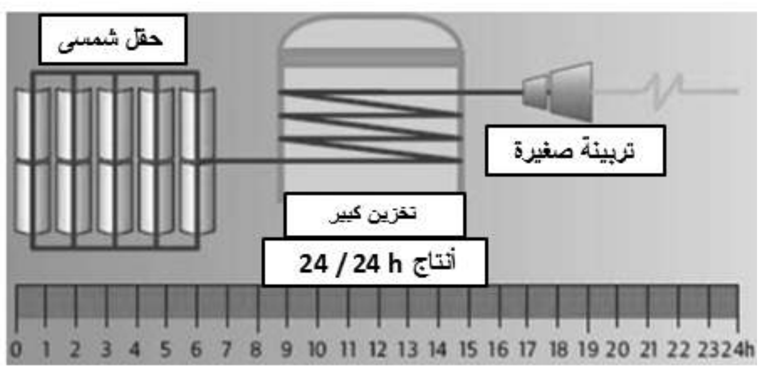
شكل (5) نظام تخزين طاقه حرارية فعال مباشر

تناسق أحمال المحطة (Load plant configuration)

نظرا للتكامل بين التحويل الحراري (Thermal storage) المحتمل والذي يسمح يتخزين الطاقه الكهربائية عند حالات طلب طاقة مختلفة، ظهرت ثلاثة حالات لمحطات الحمل هي: الأساس، الوسط والذروة.
تبعا لكل من: المصدر المختار، سعة تربينة البخار، مقاس الحقل الشمس وحجم التخزين يتم الربط بينهم طبقا للطريقة المناسبة. سيتم تعريف حالات محطات طلب الحمل مع فرض:

- ثبات مقاس الحقل الشمس (Solar field) والتي يعني أن الطاقه الكهربائية المنتجة تكون ثابتة.

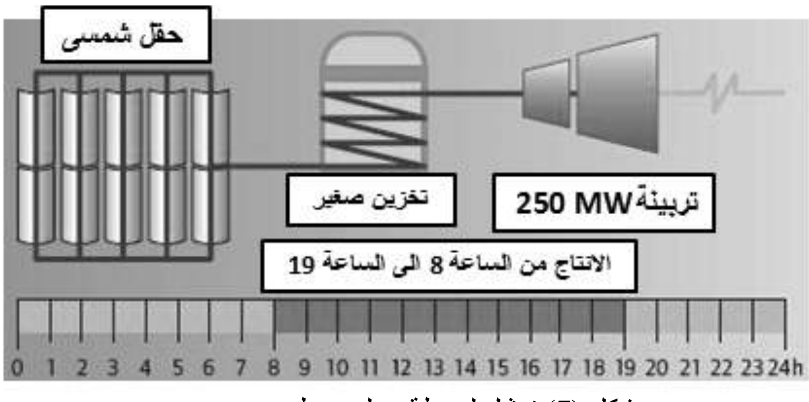
1. **محطة الحمل الاساسي (base load plant)** تحتاج محطة الحمل الأساسي في نظام حوض القطع المكافئ إلي تخزين كبير جدا، والتي تسمح لانتاج كهرباء لفترات طويلة جدا بدون اشعاع شمسي ، ويكون مقاس التربينة صغير لأن الكهرباء تنتج بصفة مستمرة، أي أن يتوزع الانتاج علي عدد كبير من ساعات التشغيل. ومن أمثلة هذا النوع سعة تربينة 120 MW يوضح شكل (6) هذا النظام



شكل (6) تمثيل لمحطة الحمل الأساسي

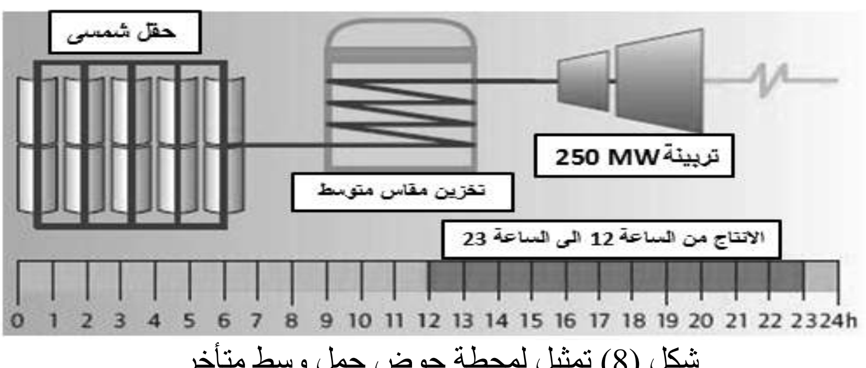
2. **محطة حمل وسط (Intermediate load power plant)** لهذا النوع تكون عدد ساعات التشغيل من الساعة 8 إلي الساعة 19، وفيه يستخدم تخزين صغير لأن الطاقه ستخزن لفترة زمنية أقل. وتكون التربينة أكبر من النوع المستخدم في محطة الحمل الأساسي، لأن الطاقه الكهربائية تكون أقل من الناتج في محطة الحمل الأساسي، وتكون التكاليف الاستثمارية لمحطات حوض حمل وسط أقل من محطات الحمل الأساسي لأن خزان التخزين أصغر والتربينة متوسطة الحجم. من بين محطات حوض القطع المكافئ يكون هذا النوع هو الأقل تكلفة

لانتاج الكهرباء ومن أمثلة هذا النوع سعة تربينة 250 MW، يوضح شكل (7) تمثيل لمحطة حمل وسط



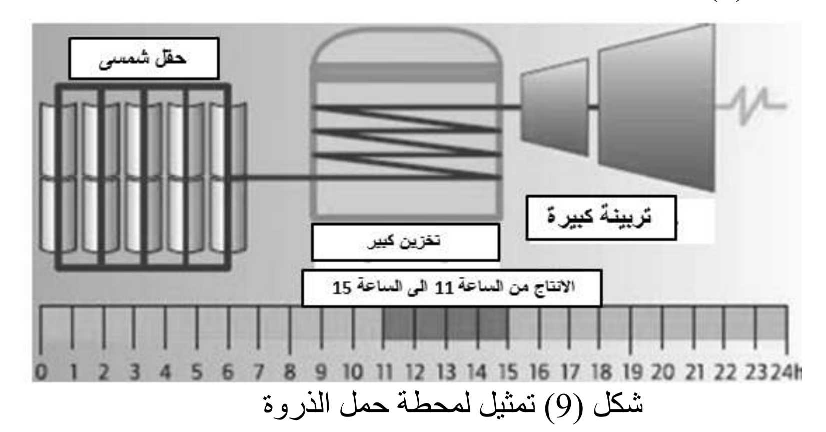
شكل (7) تمثيل لمحطة حمل وسط

3. **محطات حوض حمل وسط متأخر (delay intermediate load)** في هذا النوع يتم التخزين بخزان أكبر لنفس مدة الفترة الزمنية ولكن من الساعة 12 إلي الساعة 23. يكون حجم التربينة بنفس الحجم في حالة حمل وسط ولكن الخزان يجب أن يكون أكبر ليسمح بانتاج الكهرباء خلال فترات انخفاض الاشعاع الشمسي. يوضح شكل (8) هذا النوع



شكل (8) تمثيل لمحطة حوض حمل وسط متأخر

4. **محطة حمل الذروة (peak load)** تعمل هذه المحطة لعدد قليل من الساعات (من الساعة 11 إلي الساعة 15) ولذا تحتاج إلي تربينة كبيرة. ثم يتم تركيز الطاقه الكهربائية في فترة زمنية قصيرة. بالاضافة إلي أن الخزان الحراري يكون كبير وذلك لأن مدخل الطاقه الشمسية الكبير يجب تخزينه لامكانية تحويله إلي طاقه كهربائية لفترة قصيرة. لهذا النظام أعلي تكلفة انتاج كهرباء بين الأنظمة السابقة ، كمثال لهذا النوع سعة تربينة 620 MW وتنتج لمدة 4 ساعات هي وقت أعلي استهلاك للكهرباء والتي تكون في فترة الظهر. يوضح شكل (9) تمثيل لمحطة حمل الذروة.



شكل (9) تمثيل لمحطة حمل الذروة

يعتمد المقاس المثالي للخزان على:

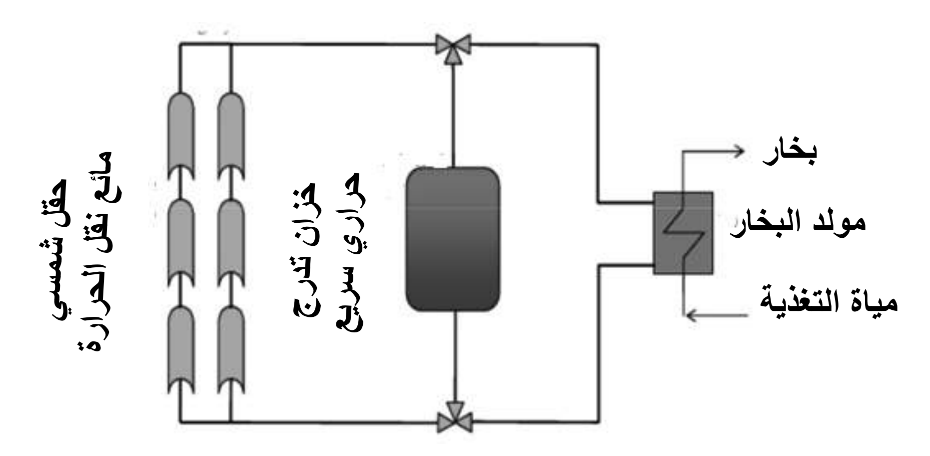
- التكاليف الاستثمارية لنظام التخزين

- استرتيجية تشغيل المحطة
- يجب الوصول ألي أقل تكاليف للكهرباء (levelized Electricity cost)

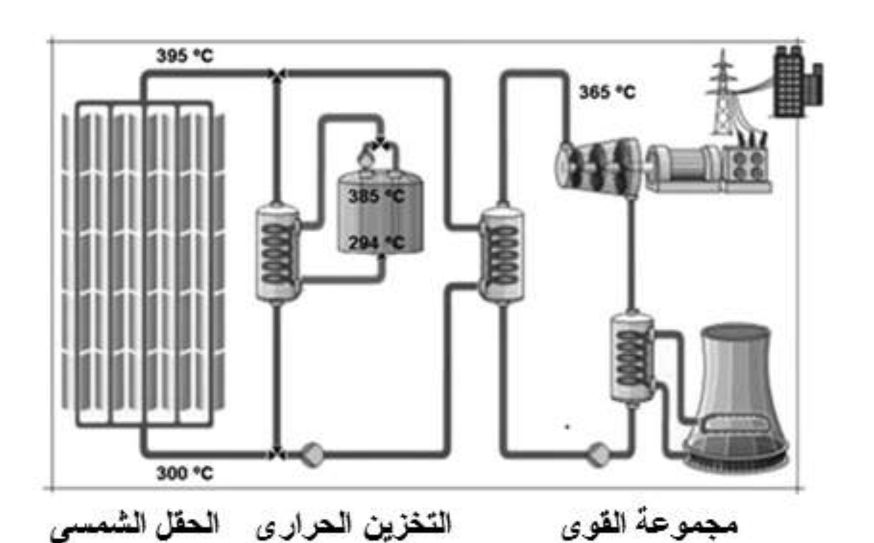
يمكن أن يحتوى نظام التخزين على خزان واحد أو خزانين

خزان واحد

خزان تدرج حراري سريع (Thermocline tank)
عبارة عن خزان واحد يحتوي علي مائع بتدريج رأسي لدرجة الحرارة، حيث يكون المائع الساخن في أعلي الخزان بينما المائع البارد في القاع. يتصف هذا النوع أنه يستخدم مادة حشو منخفضة التكاليف والتي تشكل أعمال أساسية موضحه في شكل (10)
ويوضح شكل (11) تمثيل لموضع التخزين الحرارى (خزان واحد) فى محطة المركزات الشمسية.



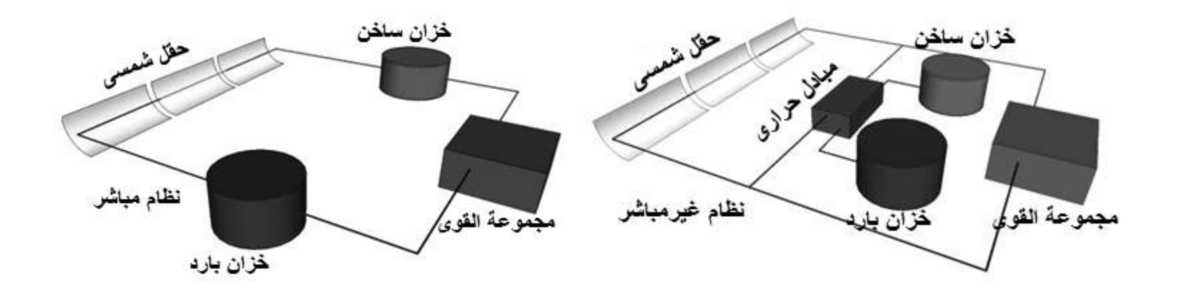
شكل (10) تمثيل خزان تدرج حراري سريع



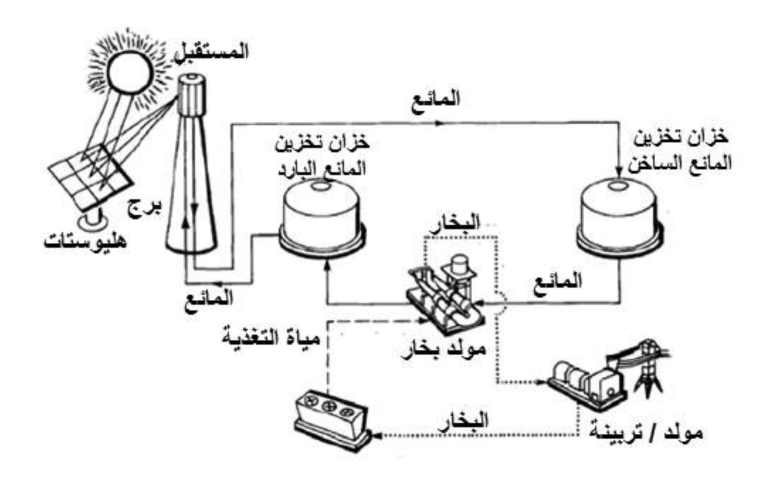
شكل (11) تمثيل لموضع التخزين الحرارى (خزان واحد) فى محطة المركزات الشمسية

نظام خزانين

في هذا النظام يستخدم خزان منفصل يعرف بالخزان الساخن وآخر خزان بارد. تعتمد مستويات درجة الحرارة علي أقصي وأدني درجة حرارة يصل اليها مائع نقل الحرارة بالمجال الشمسي
من أمثلة درجات حرارة الخزانين ذلك:
في محطة Archimede (نظام مباشر)
$T_{\text{hot,tank}} = 550°\ C, T_{\text{cold,tank}} = 290°\ C$
في محطة Andasol (نظام غير مباشر)
$T_{\text{hot,tank}} = 386°\ C, T_{\text{cold,tank}} = 292°\ C$
يوضح شكل (12) تمثيل لنظام تخزين مباشر وآخر غير مباشر
ويوضح شكل (13) رسم تخطيطى لنظام مركزات شمسية – مستقبل مركزى يحتوى على خزانين ملح منصهر (المائع)



شكل (12) تمثيل لنظام تخزين مباشر وآخر غير مباشر



شكل (13) رسم تخطيطى لنظام مركزات شمسية – مستقبل مركزى
يحتوى على خزانين ملح منصهر (المائع)

الباب السادس
محطات قوي فرسنل الخطية
Linear Fresnel Power Plants

ينسب إسم تكنولوجيا مجمعات (عاكسات) فرسنل الخطية إلي عدسات فرسنل (Fresnel lens) والتي أخترعت بواسطة الفيزيائي الفرنسي (أوجستين- جين فرسنل (Augustin-Jean Fresnel) لوضعها بالمنارات لهداية الملاحين وذلك في القرن الثامن عشر، الموضحة في شكل (1)





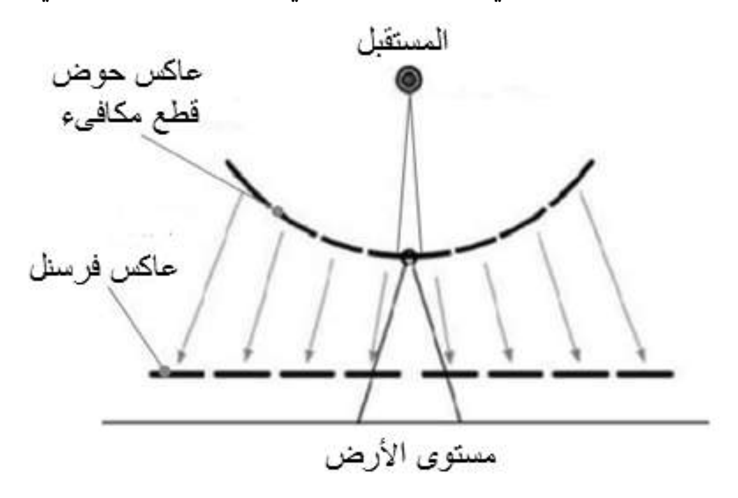
شكل (1) عدسة فرسنل

تتراوح حدود قدرة محطات فرسنل الخطية من عدة مئات من kw إلي عدد من Mw.

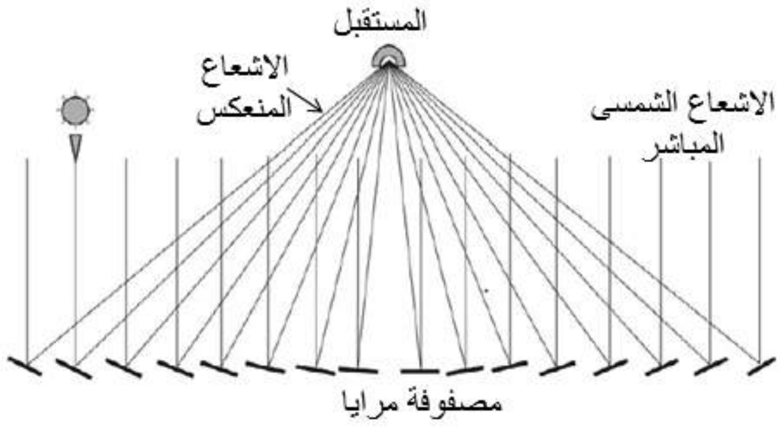
تعتمد فكرة عاكسات فرسنل علي تقسيم مرايا قطع مكافئ إلي شرائح مشكلة مرايات فرسنل كما فى شكل (2) والذى يوضح مقارنة بين عاكس حوض قطع مكافىء وعاكس فرسنل.

حيث يوضح شكل (3) أن هذه المرايا تركز أشعة الشمس علي المُستقبل المحتوي علي مائع ناقل الحرارة والذي يمكن أن يكون مياه أو زيت أو أملاح مذابة ويختار نوع المائع اعتمادا علي درجة حرارة تشغيل النظام. يوضح شكل (4) مكونات حقل فرسنل.

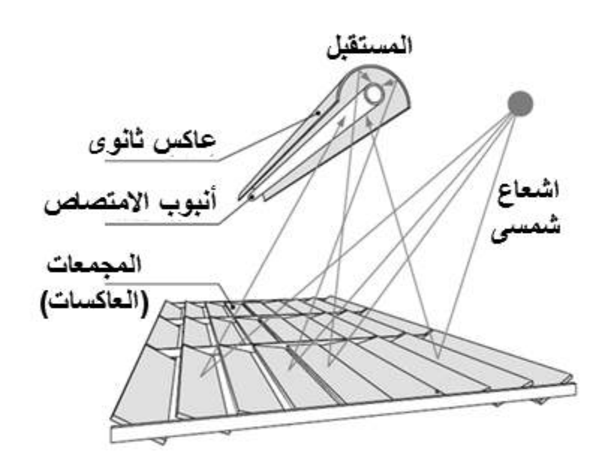
تعتبر محطات فرسنل الخطية من التطبيقات المثالية لاستخدامات الأنشطة الصناعية.
حيث يمكن الحصول علي درجة حرارة حتي 400 °C وضغط حتي 120 bars



شكل (2) مقارنة بين عاكس حوض قطع مكافىء وعاكس فرسنل



شكل (3) شرائح مرايات فرسنل مشكلة مصفوفة



شكل (4) مكونات حقل فرسنل

فيما يلى توضيح مكونات حقل فرسنل الخطى :

1- مجمع فرسنل Linear Fresnel Collector (LFC)

المجمع عبارة عن عاكسات فرسنل (FRs) (Fresnel Reflectors) والتي تعمل كمعدات تركيز وتتكون من عدد كبير من عناصر أو شرائح من المرايات الصغيرة المسطحة أو ذات انحناء بسيط، وجميعها تستقبل الأشعة المتوازية الساقطة وتعكسها علي نقطة مشتركة.

تشبه عاكسات مجمعات فرسنل (FR) محطات مجمعات حوض القطع المكافئ (PT) مع الاختلاف الآتي:

- تستخدم FR مجموعة من المرايات المسطحة أو المنحنية قليلا المركبة علي الأرض كقاعدة، موضوعة عند زوايا مختلفة لتجميع أشعة الشمس علي مُستقبل ثابت موضوع أعلي حقل المرايات بعده أمتار.
- كل خط مرايات مجهز بنظام تتبع أحادي المحور لتجميع وتركيز أشعة الشمس علي المُستقبل الثابت.

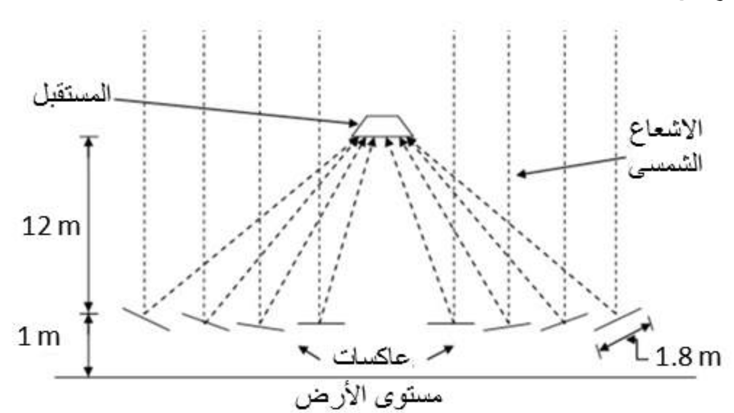
تُصنّع المجمعات من شرائح مرايا مسطحة أولها إنحناء ميكانيكي صغير جدا. تكون مادة العاكس من الفضة. في حالة محطة نوفاتك الشمسية (Novatec) استخدمت مرايا زجاجية بسمك 3mm

عند تصميم مجمعات LFCs تؤخذ هذه المتغيرات في الاعتبار:

- عرض الشرائح

- عرض المجمع الكامل
- عدد الشرائح الزجاجية المتوازية
- ارتفاع المُستقبل فوق مستوي المرايات
- المسافة بين الشرائح الزجاجية
- إنحناء المرايات

يوضح شكل (5) نموذج مقاسات المرايا وارتفاع المرايا والمُستقبل عن مستوى الأرض



شكل (5) نموذج مقاسات المرايا وارتفاع المرايا والمُستقبل عن مستوى الأرض

لتحقيق أفضل متغيرات للمجمعات يراعي الآتي:

❖ يجب ألا يكون عرض الشرائح المنفصلة للمرايات ضيق جدا، لأن ذلك يعني لنفس مساحة الفتحة يلزم عدد كبير جدا من شرائح المرايات وبالتالي يتطلب ذلك مسافات فراغات أكثر تعقيدا في الهيكل وميكانيزم التتبع.

إذا كان مقاس الشرائح مناسب تصميميا، عندئذ تعمل المرايات على عكس الإشعاع المباشر الثابت علي أنبوب المُستقبل الثابت.

مثال لمقاسات نموذج تعليمي:

قطر الأنبوب: 7.5 cm

عرض المرايا: 50cm

ارتفاع المُستقبل فوق المرايا: 7.5 m

العرض الكلي للفتحه: 17.5 m

عدد صفوف المرايا: 35 خط (صف)

- ❖ يجب ألا يكون الفراغ بين صفوف المرايا كبير جدا . كذلك ألا يكون الفراغ صغير جدا حتي لا يحدث أي ظلال أو عوائق بين صفوف المرايايات
- ❖ عند استخدام شرائح مرايا منحنية يجب ألا يكون نصف القطر صغير جدا ولا كبير جدا، لأن في كلتا الحالتين يحدث ضياع للأشعه الشمسية.

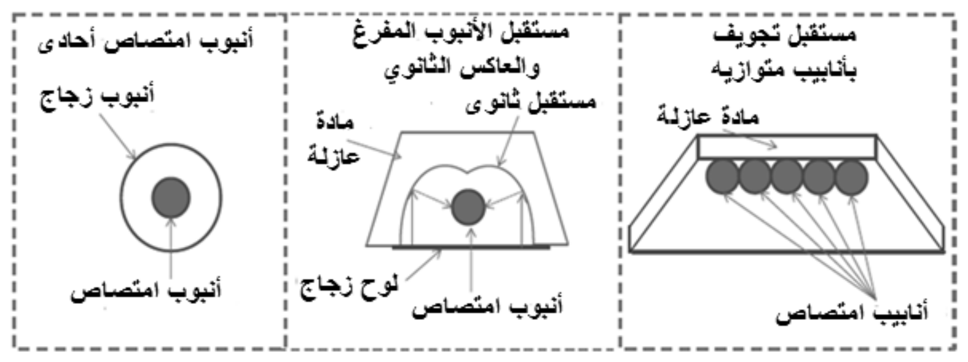
2- المُستقبل (receiver)

يكون المُستقبل ثابت وخطى ويركب علي بكرات لتعويض الامتداد الحراري الناتج من إرتفاع درجات الحرارة خلال التشغيل. في حالة المُستقبلات المصنوعة من الصلب ، يكون التمدد الحراري الطولي عند درجات الحرارة العالية للتشغيل حوالي 0.6% اي 6m لطول مُستقبل 1000 m

أنواع المُستقبلات:

يوجد عدة أنواع من المُستقبلات والموضحة بشكل (6 - أ) ' فيما يلى توضيح الأنواع المستخدمة:

- مُستقبل الأنبوب المفرغ والعاكس الثانوي
- مُستقبل تجويف بأنابيب متوازية



شكل (6 - أ) أنواع المُستقبلات

- مُستقبل الأنبوب المفرغ والعاكس الثانوي (Evacuated tube receiver and secondary)

يتكون المُستقبل من أنبوب طويل مطلي يحول المياه المار به إلي بخار مشبع. نظرا لتعرض الخط البؤري (focal line) إلي تشوه نتيجة خاصية اللابؤرية (astigmatism) (أي الأشعة المنبعثة من نقطة لا تجتمع في نقطة بؤرية واحدة) لذا يتم تركيب عاكس ثانوية أعلي المُستقبل وذلك لإعادة تركيز أشعة الشمس إلي الخط البؤري.

كمثال، في محطة Novatec ، يكون قطر أنبوب المُستقبل 7 cm، وعرض العاكس الثانوي 30 cm

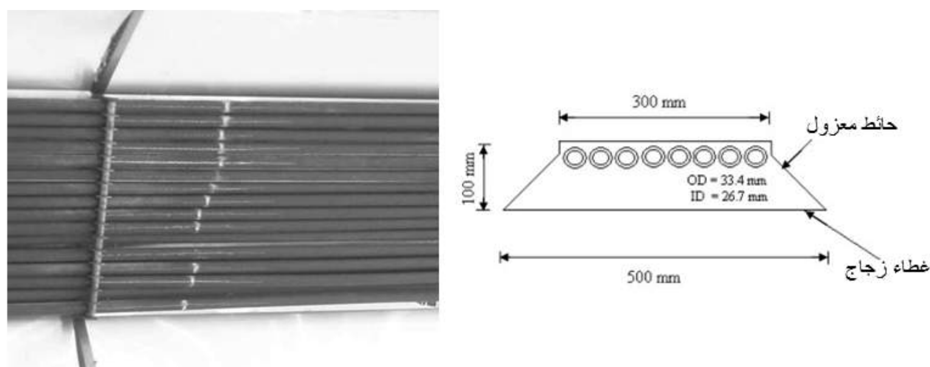
- مُستقبل تجويف بأنابيب متوازيه (Cavity with parallel tubes (receiver

يتكون المُستقبل من :

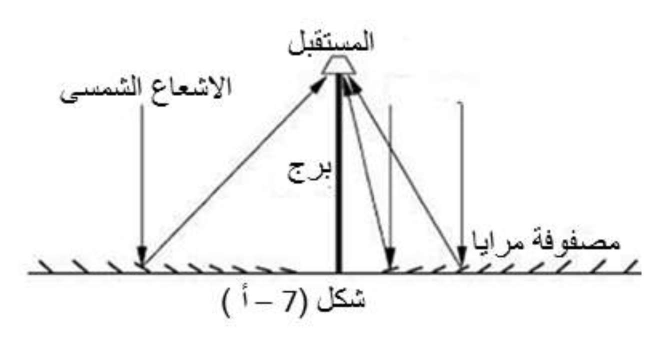
- عدد من أنابيب صغيرة القطر موضوعة في الخط البؤري
- تجويف معزول على شكل شبه منحرف
- لا يحتوي علي عاكس ثانوى
- غطاء زجاجي لتخفيض المفقودات الحرارية.

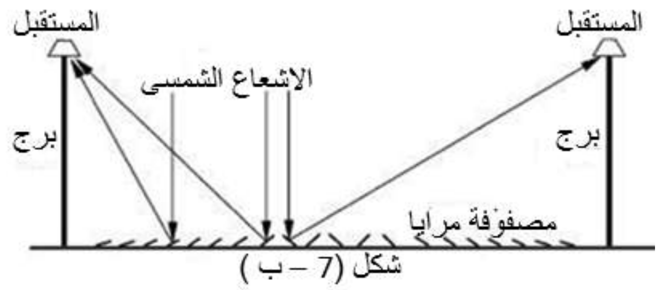
يوضح شكل (6 - ب) مثال لمُستقبل تجويف بأنابيب متوازية

يوضح شكل (7- أ) تمثيل لحقل عاكسات فرسنل الخطية (المرايا والمستقبل)، وللتغلب على المشاكل الناتجة عن الظل أو عن حدوث إعاقة من تقارب العاكسات، يتم استخدام أكثر من مُستقبل خطى ثابت كما فى شكل (7 – ب)



شكل (6 - ب) مثال لمُستقبل تجويف أنابيب متوازية





شكل (7) تمثيل لحقل عاكسات فرسنل الخطية

3- مائع ناقل حرارة (Heat Transfer Fluid) (HTF)

نظرا لأن المُستقبل ثابت فإنه يسهل الإختيار الواسع لنوع المائع المستخدم كالآتي:

- تستخدم المياه كمائع عند الإحتياج لدرجات حرارة منخفضة
- والزيت لدرجات الحرارة العالية
- والبخار لدرجات الحرارة الأعلي
- والأملاح الذائبة لأعلي مدي لدرجات الحرارة
- بالإضافة إلي استخدام الهواء أو CO_2 المضغوط لأعلي درجات حرارة تشغيل

فتحة المجمع (Aperture)

تعرف فتحة المرايا (المجمع) بمساحة مرايا العاكسات في الوضع الأفقي والتي تجمع كمية الإشعاع الشمسي.

عادة تقييم الفتحة علي أساس طول المرايا الواحدة أو الموديول الواحد.

زيادة فتحة المرايا تعني زيادة كمية الإشعاع الشمسي المنعكس علي المستقبل. كمثال للأنظمة الكبيرة يكون عرض الفتحة النموذجي حوالي 15 m

توصف فتحة المُستقبل بمساحة المُستقبل/ طول المرايا أو الموديول وتتغير تبعا لتصميم النظام. يكون عرض المُستقبل مساوي تقريبا لعرض المرايا، ولكن يكون أقل إذا استخدمت مرايا ذات إنحناء.

كمثال لمحطة تجريبية:

- عرض المرايا = 21 m
- عرض المُستقبل = 0.5 m
- نسبة التركيز = 42

يوضح جدول (1) خصائص بعض مجمعات فرسنل الخطية الشمسية

جدول (1) خصائص بعض مجمعات فرسنل الخطية الشمسية

الخاصيه	الإسم التجاري للمحطة			
	Movatec Nova 1	SPG Fresdemo	SPG Type 3	Mirroxx LF
طول الموديول(m) (module length)	44.8	100	96	65
عرض فتحه الموديول (m) (module aperture width)	16.56	21.25	22	7.5
طول البؤرة (m) (focal length)	7.4	8.25	8.8	4
المساحة الكلية للموديول (m^2) (module net area)	513.6	1432.3	1467.8	351.0

المميزات الأساسية لمجمعاتLFCs:

1. وزن منخفض
2. إنتاج بخار مباشر بسيط
3. إمكانية التكامل البسيط مع مجموعة القوي
4. عمر تشغيل طويل
5. يمكن التركيب علي الأسطح أو الأرض
6. انخفاض الإستثمارات وتكاليف التشغيل

تكون المرايا المسطحة اسهل وأرخص في الإنتاج عن حوض القطع المكافئ، وبالتالي فهي متاحة صناعيا وعالميا، ويكون أيضا شكل الهيكل منخفض، بمرايات علي إرتفاع متر أو مترين فوق الأرض، أي الهيكل أبسط وأقل وزن.

الاختلافات الأساسية بين مجمعات (LF) ومجمعات (PT):

- تستخدم LFCs مرايات مسطحة منخفضة التكاليف (6-20 €/m²) بينماPTCs تستخدم مرايات منحنية قطع مكافئ مرتفعة التكاليف 30 -25 (€/m²) لأن المرايات الزجاجية المسطحه هو إنتاج شائع قياسي.
- تحتاج LFCs إلي مواد صلبة غير ثقيلة، حيث يستخدم معدن لتثبيت الهيكل بخرسانة قليلة أو بدون خرسانة (لتسهيل عملية تجميع المكونات)
- الإنشاءات بالموقع تكون أسرع في حالة LFCs
- تكون أحمال الرياح أقل في حالة LFCs، والتي تؤدي إلي استقرار أسهل للهيكل، وفقد ضوئي أقل، مع تعرض أقل لكسر زجاج المرايات
- كل LFCs بمحطات القوي التجارية تستخدم مياه/ بخار تحت ضغط كمائع ناقل للحرارة صديق للبيئة . ولذا تحتاج المحطات المنتجة للبخار المباشر إلي مبادلات حرارية أقل من التي تستخدم الزيت الحراري كمائع ناقل للحرارة
- تحتاج PTCs لتحديد فتحة المجمع بعدد أمتار قليلة، بينما في LFCs يمكن أن تكون فتحة المجمع أكبر عند تكلفة منخفضة.

تطبيقات مجمعات فرسنل الخطية:

- إنتاج حرارة متوسطة

تستخدم أنظمة الحرارة المتوسطة في التطبيقات الصناعية وكمساعد لمحطات القوي التي تعمل في مدي 100°C الي 250°C ويمكن استخدام المياه أو الزيت كوسط مائع ناقل للحرارة.

- إنتاج بخار مباشر

استخدام البخار كوسط مائع ناقل للحرارة ، تسمح بدرجات حرارة عالية لأنه لا يوجد مخاطر مماثلة للزيت الحراري . تعمل درجة الحرارة بمحطة Novatec الشمسية إلي ° 450استخدام البخار يقلل المفقودات الحرارية. إذا حدث أي تسريب من البخار فإنه لا يسبب تلوث للبيئة مثل الزيت الحراري.

يوضح جدول (2) أنواع مجمعات فرسنل التجارية

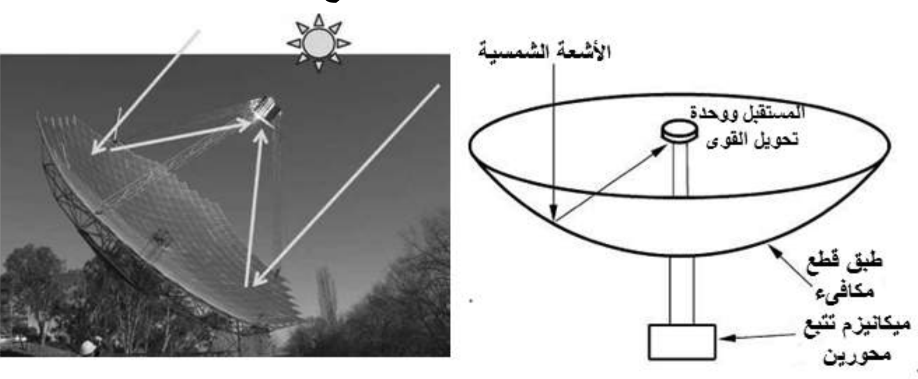
جدول (2) أنواع مجمعات فرسنل التجاري

المكان	المُستقبل	عرض الفتحة	المحطة
Calasparra,regio nMurcia, Spain 1.4MW	أنبوب إمتصاص أحادي مع مُستقبل ثانوي	12 m (16 مرايا مقاس 75 cm)	NovatecBio Sol (Morin 2010)
Plataforma Solar de Almeria, Andalucla, Spain	أنبوب إمتصاص أحادي مع مُستقبل ثانوي	15 m (25 مرايا مقاس 60 cm)	Fresdemo SPG and Man (Bernhard 2009)

Kimberlina, California USA 5MW	مُستقبل متعدد الأنابيب لا يحتوي علي مُستقبل ثانوي	20m (حوالى) (10 مرايات مقاس 2 m)	Areva Solar (Areva 2010)
Freiburg (Germany) Bergamo (Italy) Sevilla (Spain) Tunisia,Masdar (UAE)	أنبوب إمتصاص أحادي مع مُستقبل ثانوي	5.5m (11 مرايا مقاس 50 cm)	PSE/Mirrox x (PSE 2010)
La SeynesurMer, region of Toulon France 1 MW	أنبوب إمتصاص أحادي مع مُستقبل ثانوي. (إنتاج بخار مباشر)	20m (14 مرايا)	CNIM)

الباب السابع
محطات قوى مجمعات طبق قطع مكافئ
Paraboloidal dish collectors Power Plants

يتكون هذا النظام من مرآة واحدة أو عدد من المرايا الصغيرة تشكل فيما بينها مرآة واحدة لها بؤرة واحدة، هذه المرآة مقعرة قطع مكافىء دائرى مشابهة لطبق ضخم (مركز/ عاكس) Paraboloidal concentrator (parabolic dish)، تقوم بعكس وتركيز الإشعاع الشمسى على البؤرة بنسبة تركيز تتراوح بين 600 إلى 2000 ضعف، يركب فى البؤرة مستقبل حرارى ووحدة تحويل القوى (أو آلة) (PCU)
(Power Conversion Unit) ، هذه الوحدة تحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية والتى بدورها تغذى مولد لانتاج الطاقة الكهربائية، يوضح شكل (1) تمثيل طبق قطع مكافىء . ويعتبر المركز الشمسى (المستقبل) والآلة وحدة واحدة والذى يطلق علية Dish Engine / تستخدم هذه الوحدات كوحدات لانتاج الطاقة الكهربائية للمناطق المعزولة عن الشبكة الكهربائية العامة، أو المبعثرة، أو أن تربط مع الشبكة الكهربائية.



شكل (1) تمثيل طبق قطع مكافىء

يقوم واحد أو أكثر من أطباق قطع مكافىء بتركيز الطاقة الشمسية عند نقطة اتصال واحدة، مثل التلسكوب العاكس والذي يقوم بتركيز ضوء النجوم، أو طبق هوائي يستخدم لتركيز موجات الراديو اللاسلكية.

ويوجد نوعان من الظواهر الرئيسية تؤخذ فى الاعتبار عند تصميم طبق قطع مكافىء هما:

- أن شكل القطع المكافئ يتم تعريفه بحيث أن الأشعة الواردة والتي هي موازيه لمحور الطبق سوف يتم عكسها تجاه البؤرة، بغض النظر عن مكان وصولها على الطبق.
- أن أشعة الضوء من الشمس والتي تصل لسطح الأرض تكاد تكون متوازية تماما. فإذا كان الطبق محاذيا مع محوره مشيرا إلى الشمس، فإنه سوف يتم انعكاس كل الأشعة الواردة تقريبا تجاه نقطة البؤرة للطبق

معظم مفقودات الأشعة تكون نتيجة بعض القصور في شكل القطع المكافئ والانعكاس غير الكامل . بينما تكون المفقودات الناتجة عن الأجواء ما بين الطبق ونقطة البؤرة تكاد تكون منعدمة ، حيث أن الطبق يصمم ليكون صغير بما يكفي بأن يكون هذا العامل غير ذي أهمية في يوم مشمس ومشرق. إذا كان الطقس غير رائق أو ضبابي، فإن هذا قد يقلل من كفاءة طبق القطع المكافىء إلى حد كبير. وفي تصاميم محطات توليد الطاقة باستخدام الأطباق قطع مكافىء، يتم وضع الآلة الحرارية بالإضافة إلى دينامو في بؤرة الطبق، والتي تمتص الحرارة من الإشعاع الشمسي الحادث وتحوله إلى كهرباء.

وتعتبر تكنولوجيا طبق قطع مكافىء أحد تكنولوجيات تركيز نقطة . وأنها التكنولوجيا الوحيده التي توصف بالمعيارية (modular)،أي أنه يمكن إستخدامها إما لإنشاء محطة مركزات شمسية حرارية كبيرة تتكون من العديد من الأطباق ، أو إستخدامها كمحطة قوى منفصلة(معزولة عن الشبكة الكهربائية العامة) في الأماكن البعيدة بالقرى لإنتاج الطاقة الكهربائية أو لضخ المياه.

لأنظمة مجمعات المركزات الشمسية الحرارية يوجد نوعين من الكفاءة هما:

- الكفاءة البصرية (optical efficiency)
  والتي تشير إلى مقدرة كل مجمع لتركيز الأشعة الشمسية.
- كفاءة التحويل الشمسي إلى كهرباء (solar- to- electric efficiency)
  والتي تعني المقدرة الكلية للنظام لتحويل الأشعة الشمسية إلى كهرباء.

في تكنولوجيا مجمعات التركيز في نقطة(focal collectors) تكون الكفاءة البصرية أعلى من كفاءة مجمعات التركيز الخطية (linear collectors) نظرا لأن تركيز

الأشعة الشمسية يتم في نقط فردية بدلا من الأنابيب الطولية الخطية. بالإضافة إلى أن نظام التتبع في مجمعات النقطة يكون بمحورين والذي يؤدي إلى إرتفاع التكاليف.
لعاكسات الطبق أعلى مستويات تركيز والتى تصل معمليا إلى 10000 ضعف ،هذا التركيز العالي يؤدي إلى كفاءة بصريةعالية وبالتالي درجة حرارة عالية وتحسين كفاءة التحويل الشمسي إلى كهرباء حيث تكون بين 30%، 25%
لمركزات طبق قطع مكافىء وحدة مولد / محرك (motor / generator unit)
وتصنف أنواع وحدة تحويل القوى (Power Conversion Unit) (PCU) الى:

- تربينة غازية (Gas Turbine).
- انتاج بخار مباشر (Direct Steam Generation).
- آلة أو محرك ستيرلنج(Stirling Engine).

تعتبر أنظمة طبق ستيرلينج هى الأكثر شيوعا وتستخدم فى وحدات المركزات الشمسية الصغيرة نسبيا والتي تتعقب الشمس وتركز الطاقة الشمسية على مستقبل مجوف (cavity receiver) موضوع في نقطة مركز العاكس، والذي فيه يتم الإمتصاص والتحويل إلى مولد / محرك حراري(heat engine / generator) . يعمل الطبق من خلال نظام تتبع بمحورين لضمان الحصول على الإشعاع المثالي للمرايات.

دائما يكون الطبق موجها إلى الشمس، ويتميز بأنه التكنولوجيا الأكثر كفاءة بين المجمعات الشمسية الحرارية. وتصل إليه نسبة التركيز إلى نسب عالية جدا. عادة يتراوح عرض الطبق بين 5m ، 15m ، يمكن أن يكون للطبق سطح واحد أو عدة واجهات صغيرة.

المحرك الحراري (heat engine)
يستخدم عادة محرك حراري بريتون (Brayton) أو سترلنيج كمحرك حراري في أنظمة طبق القطع المكافئ. هذا النظام مناسب للقدرات الصغيرة حتى 50kw

- دورة جول – بريتون (joule- Brayton cycle)
  يستخدم غاز ضغط منخفض كمائع تشغيل (كفاءة تحويل حرارة منخفض).
- دورة سترلينج (stirling cycle)

عبارة عن دائرة تحت ضغط يستخدم الغاز كمائع تشغيل(N_2, H_e ,H_2)
للنوعين H_2, H_e كفاءة تحويل حرارة عالية ، وبخصائص:

$$P_{max} \approx 20\ M_{pa}$$

$$T_{max} \approx 700°C$$

حاليا يوجد نوعين من محرك سترلينج هما:

- محرك حركي (kinematic engine)

يعمل المحرك بالهيدروجين كمائع تشغيل ، والذي له كفاءة أعلى من محرك الكباس الحر.

- محرك الكباس الحر (free piston engine)

يعمل المحرك بالهيليوم ولا ينتج عن تشغيله أي إحتكاك خلال التشغيل، وبالتالي تنخفض أعمال الصيانة المطلوبة.

تطورت محركات الكباسات الحرة الإسطوانية المتعددة وأمكن الوصول إلى تخفيض التكلفة وتبسيط الفكرة كلية.

لأن المستقبل الشمسي عبارة عن مبادل حرارى خارجي يمتص الطاقة الحرارية المستقبلة من الشمس، هذا يؤدي إلى تسخين وضغط الغاز في أنابيب المبادل الحراري الساخن أى تسخين المائع (والذي عادة إما أن يكون هيدروجين (hydrogen) أو هيليوم(helium) إلى درجة حرارة حتى 1500°C وضغط 150 bars . ثم يشغل ماكينة سترلينج عند درجة حرارة تشغيل حوالي 800°C . يوصل المولد بالماكينة والذي ينتج مخرج طاقة كهربائية. تتحول الحرارة المفقودة من الماكينة إلى الجو المحيط عن طريق مبادل حرارى (مشع) (radiator) مثل المستخدم في السيارات. يتم تبريد الغاز بواسطة المشع ويعاد تدويره بإستمرار في الماكينة خلال دورة القوى.
(- الهليوم : عنصر غازى رمزة He وعددة الذرى 2 وهو أخف الغازات بعد الهيدروجين
- الهيدروجين : عنصر غازى رمزة H وعددة الذرى 1 وهو أخف العناصر وزنا، يستخدم فى مشاعل الهيدروجين الذرى والأكسى هيدروجين لإعطاء درجات حرارة مرتفعة).

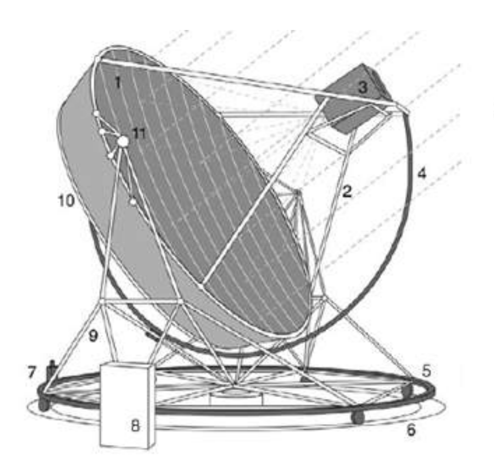
يستخدم مائع نقل الحرارة لتدوير الماكينة الحرارية ،(والتي غالبا ما تكون ماكينة سترلينج)، ثم يحول المولد الحركة الميكانيكيةإلى طاقة كهربائية. يمكن أن ينتج نظام طبق سترلينج الواحد بين 5kw ،25kw ووصلت القدرة حاليا الى 50 kw، يبين شكل (2) توضيح لأنابيب المائع. هذا النظام لا يحتاج إلى تخزين حراري ولا إحتمالية نقل طاقة حرارية. ولكن نجد أن الطاقة الشمسية تتحول مباشرة إلى الطاقة الكهربائية.

العيب الرئيسي لهذه التكنولوجيا هو الشكل الهندسي المعقد للعاكس والذي يكون مكلفا إقتصاديا ، وبالتالي يزيد الإحتياج إلى الصيانة بالإضافة أن كل طبق يحتوي على المولد والماكينة الخاصة به.

منذ أكثر من 20 سنة ، سجلت تكنولوجيا طبق سترلينج كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربية أكبرمن 31.25%. ويوضح شكل (3) مكونات مجمع طبق قطع مكافىء (Lovegrove and Csiro,2012)، ويبين شكل (4) حقل مجمعات طبق قطع مكافىء كما يوضح جدول(1) بيانات الأداء لتكنولوجيا طبق سترلينج.



شكل (2) تمثيل لأنابيب مائع طبق قطع مكافىء



1 طبق مركز
2 هيكل تثبيت وحدة تحويل القوى
3 وحدة تحويل القوى
4 دليل إدارة الارتفاع
5 دليل إدارة السمت
6 أساس
7 إدارة السمت
8 كابينة الكهرباء
9 قاعدة
10 هيكل تثبيت مستدير
11 تحميل الارتفاع

شكل (3) مكونات مجمع طبق قطع مكافىء (Lovegrove and Csiro, 2012)



شكل (4) حقل مجمعات طبق قطع مكافىء

جدول(1) بيانات الأداء لتكنولوجيا طبق سترلينج

البند	التوصيف
السعة بوحدة MW(Capacity)	0.01 -0.4
نسبة التركيز concentration	1000 – 3000
أقصى كفاءة إشعاع (Peak solar efficiency)	29%
كفاءة إشعاع سنوية (annual solar efficiency)	16-18 %(*) 18- 23 %(**)
كفاءة الدورة الحرارية (thermal cycle efficiency)	30-40% (سترلينج) 20-30% (تربينة غازية)
عامل السعة (شمسي) (capacity factor (solar))	25% (**)
الأرض المستخدمة بوحدة m^2/ Mwh/y (land use)	8 – 12

حيث (*) عمليا (**) مشاريع

كفاءة الإشعاع = (القوى المنتجه النهائية) ÷ (حزمة الإشعاع المباشر)

عامل السعة =(عدد ساعات التشغيل للأشعة سنويا) ÷ إجمالي عدد ساعات السنة (8760)

مميزات مجمعات طبق قطع مكافئ:

- في أغلب الإنشاءات، يستخدم تبريد جاف (dry cooling)، والمناسب للمناطق ذات الأحوال الجوية الجافة (بعض أنواع المركزات الشمسية الأخرى تعمل بالتبريد الجاف، ولكن التكنولوجيا القياسية موضوعة على أساس أنظمة التبريد الرطب).
- قابلية التكيف مع الميول، حيث يمكن إستخدامها بسهولة في المناطق الجبلية (ليس مطلوب مستوى أرضي محدد).

- أعلى كفاءة تحويل شمسي لأنها دائما تتعرض كل فتحة الطبق لأشعة الشمس المباشرة وهذا يعمل على عدم ظهور تأثير مفقودات جيب تمام الزاوية (cosine loss).
- توجد أطباق صغيرة بقطر عدة سنتيمترت.
- أعلى درجة حرارة تشغيل.
- الأعلى فرص للتحسين.
- يمكن ربط النظام مع الشبكة العامة للكهرباء (on- grid) أو يكون منفصلا (off- grid) .
- قابلية المزج مع أنظمة تشغيل أخرى (مثلا شمسي / وقودي أحفوري).
- يمكن إستخدام النظام في أغراض مختلفة مثل: تسخين المياه ، ضخ المياه، أو كمصدر كهرباء إحتياطي.

عيوب مجمعات طبق قطع مكافئ:

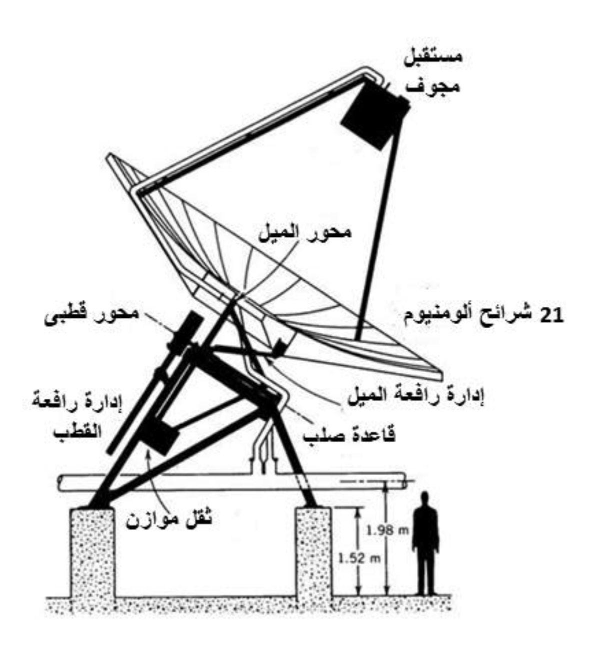
- إرتفاع تكاليف النظام والصيانة.
- تأثير التلوث عالي.
- صعوبة التخزين الحراري.

تطبيقات

طبق شيناندواه (Shenandoay Dish)

تم تصميم طبق شيناندواه (فى Virginia) لتطبيقه على مشروع التوليد المشترك للطاقة الشمسية الحرارية الموجود في شيناندواه . بغرض تسخين زيت السيليكون المار فى احد المسارات إلى 400 درجة مئوية (750 فهرنهايت) مع درجة حرارة مدخل 260 درجة مئوية (500فهرنهايت). وقد تم تصميم الطبق من قبل شركة جنرال إلكتريك وتصنيعه من قبل شركة كينيتكس الشمسية، والموضح بشكل (5) مكونات طبق شيناندواه، **يتكون من:**

- طبق قطع مكافئ كعاكس قطر 7 متر.
- عدد 21 شرائح ألومنيوم، وتغطي على جانب واحد بـ 244 فيلم عاكس.



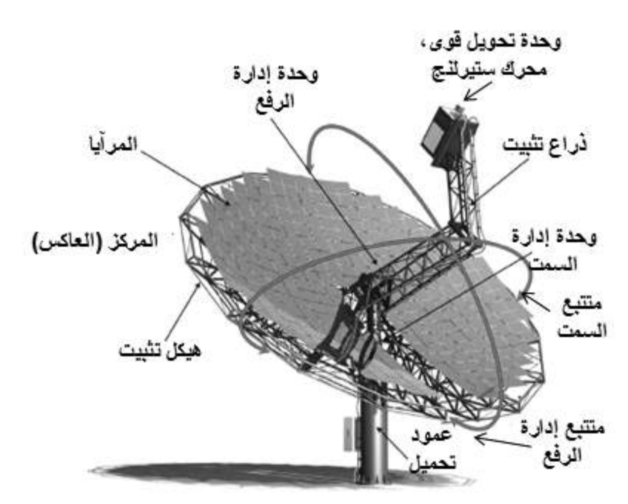
شكل (5) مكونات طبق شيناندواه

يوضح شكل (6) محطة لإنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية معا . يعكس طبق قطع المكافئ من خلال سطح المرآة الإشعاع الشمسي إلى وحدة تحويل القوى - PCU (power conversion unit) بالنقطة المحورية – الجزء الرئيسي من وحدة تحويل القوى هو محرك ستيرلينج الذي يحول الطاقة الحرارية المكتسبة من الإشعاع الشمسي إلى طاقة ميكانيكية ومن ثم إلى طاقة كهربائية عن طريق مولد. هذا النظام يسمح أيضا بالاستفادة من الطاقة الحرارية غير المستخدمة والحرارة المفقودة، بحيث أن محطة الطاقة الشمسية يمكن استخدامها أيضا للحصول على كل من الحرارة والبرودة. ويتميز هذا النظام بالتحكم الآلي بالكامل وتحديد مواقع المركز من خلال محورين ويعمل النظام في ظروف قاسية. يمكن إنتاج الكهرباء وبيعها أو استخدامها للاستهلاك الفوري. من خصائص هذا الطراز:

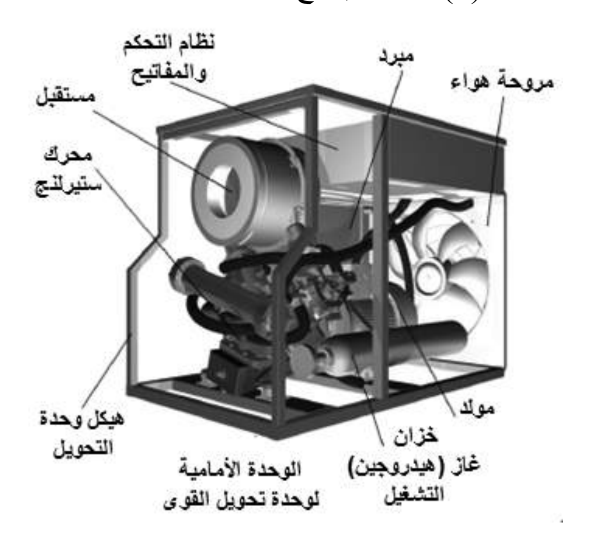
- أقصى قدرة كهربائية 10 kWh
- أقصى طاقة حرارية 25 kWh
- كفاءة عالية (25% electrical, +70% total)

يوضح شكلى (7) & (8) مكونات محطة لإنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية الموضحة بشكل (6).

لأنشاء حقل لأنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية بقدرة 1MWمن هذا النوع يحتاج حوالى واحد هكتار (hectare).



شكل (6) محطة لإنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية



شكل (7) وحدة تحويل القوى للمحطة بشكل (6)



شكل (8) محرك ستيرلنج للمحطة بشكل (6)

يوضح شكل(9) محطة مزرعة طبق سترلينج (Maricopa Dish Stirling Farm) في أريزونا تتكون من 60 وحدة طبق ستيرلنج، قدرة الوحدة 25 Kw وبأجمالى قدرة $1.5MW_e$



شكل (9) محطة نظام طبق سترلينج في أريزونا

من أهم أنظمة طبق سترلينج – قطع مكافئ – ذات محوري تتبع النوع الموضح في شكل (10 – أ) والذي ينتج أقصى قدرة $25kW_e$ (عند إشعاع مباشر $1000w/m^2$).

هذا النوع عبارة عن هيكل طبق تركيز شمسي نصف قطرى (radial) لتثبيت مصفوفة من وجهات مرايات زجاجية منحنية، قطر الطبق حوالي 11.6m (مساحة سطح الزجاج= $90m^2$) والذي منه ينتج نسبة تركيز حوالي 7500. تتركز أشعة الشمس على أنابيب المستقبل (عند إرتفاع بؤرة يساوي7.45m) وتحتوي الأنابيب على غاز الهيدروجين.

توجد أنواع صغيرة مماثلة لهذا النوع (شكل (10 – ب)) وبقدرة قصوى $3kw_e$ وكفاءة 24% وتستخدم ماكينة سترلينج بكباس واحد حر (single free piston) له نظام محكم ضد تسريب الهليوم، وبالتالي لا يحتاج إلى صيانة





شكل (10) طبق سترلينج قطع مكافئ ذات محوري تتبع

ويوضح شكل (11) محطة نظام طبق سترلينج في إسبانيا بقدرة $1.0\ Mw_e$ بإستخدام وحدات قدرة 3kw

هذه الأنظمة لا تحتوي على دورة بخار مثل أنظمة المركزات الشمسية الأخرى أى أنها لا تحتاج لإستخدام مياه لتحويل العمليات بالنظام، وهذه ميزة هامة جدا في أنظمة طبق سترلينج عن أنظمة المركزات الشمسية.



شكل (11) محطة نظام طبق سترلينج في إسبانيا

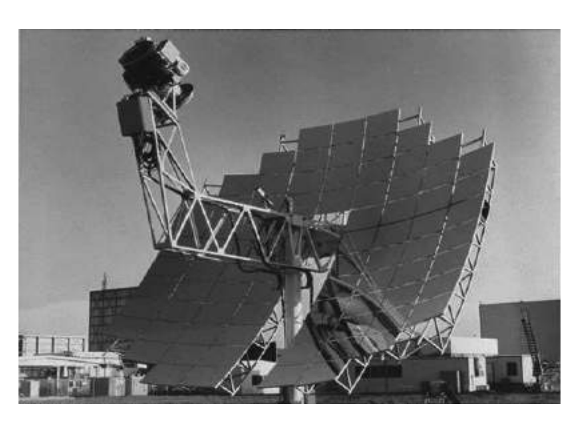
يوجد الكثير من نماذج طبق سترلينج تم تشغيله بنجاح خلال السنوات الماضية ، بقدرات من 2.5kw إلى 10kw بالإضافة إلى طبق كبير 100kw و $400m^2$ بجامعة أستراليا الإقليمية (Schaech, Bergmann).

مثل باقي النماذج ، يضاف وقود مساعد مثل الوقود الاحفوري أو الكتلة الحيوية (bio mass) ، والتي يمكن الحصول منها على الكهرباء في حالة عدم وجود الشمس. من خلال المشروع الأوروبي (EURO- DISH) تم تطوير محرك طبق سترلينج قدرة 10kw مع مشاركين من الصناعة والباحثين ،في أسبانيا يوضح شكل(12) هذا النموذج.



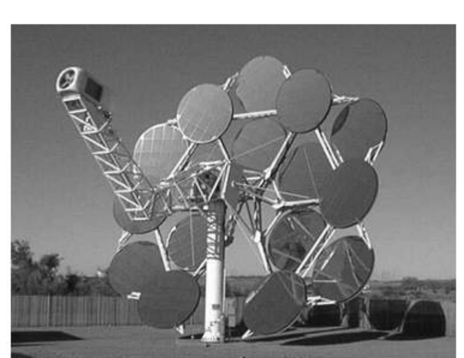
شكل (12) تطوير محرك طبق سترلينج قدرة 10 kw

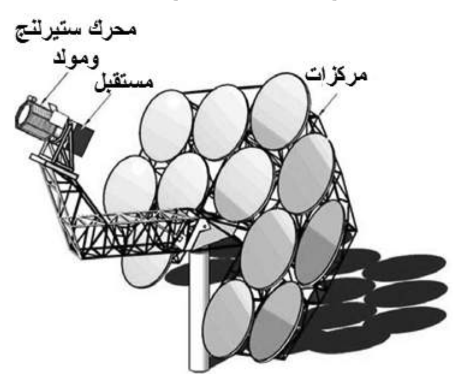
يوضح شكل (13) نظام طبق ستيرلنج يحتوى على مركز شمسى بمساحة 944 قدم مربع بمرآيا زجاج منحنى كل واحدة 3 قدم فى 4 قدم وتستخدم غاز هيدروجين كضاغط تشغيل



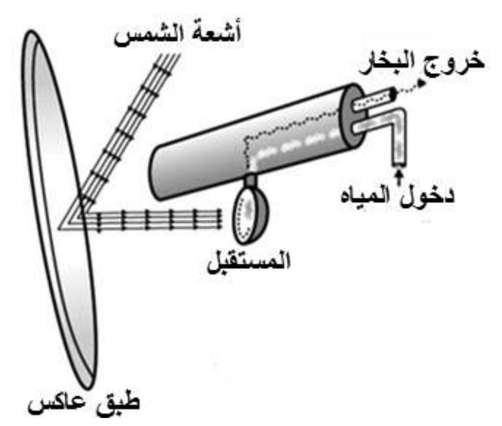
شكل (13) نظام طبق ستيرلنج

يوضح شكل (14) استخدام عدة أطباق صغيرة كمركزات (عاكسات). كل طبق ينتج من 5 kW الى 25 kW كهرباء، ويمكن استخدام طبق أو أكثر مستقلا أو مرتبطين معا لزيادة القدرة المطلوبة. أنشأت محطات من أطباق قدرة 25 kWبأجمالى 650 kW وبمساحة أرض حوالى واحد هكتار (hectare). يمكن استخدام مجمعات من أطباق قطع مكافىء لإنتاج البخار، حيث يوضح شكل (15) تمثيل لعمل هذا النظام.





شكل (14) استخدام عدة أطباق صغيرة كمركزات



شكل (15) تمثيل طبق قطع مكافىء لإنتاج البخار

ملحق

دورة ستيرلنج:

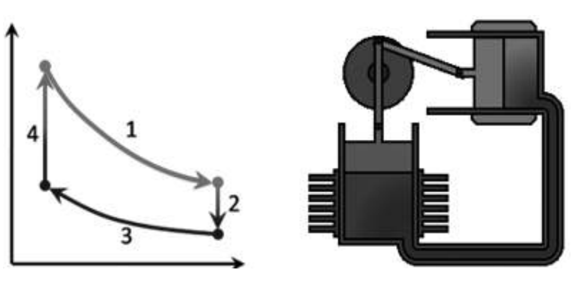
دورة ستيرلنج هي دورة تحريك حراري والتي تعبر عن المحركات التي تعمل بمبدأ ستيرلنج بما يحتويه محرك ستيرلنج الذي تم إختراعه وتطويره عام 1816م بواسطة القس الدكتور: روبرت ستيرلنج (Robert Stirling) (1878 – 1790). توصف دورة ستيرلنج بأنها دورة إنعكاسية وذلك يعني أنه إذا تم إضافة طاقة ميكانيكية إلى الدورة فإنها تعمل كمضخة حرارية للتسخين أو التبريد، وتعد دورة مغلقة وفيها المائع هو من النوع الغازي. توصف الدورة المغلقة أن المائع يسرى في الدورة دائما ويكون بداخل النظام الحراري ولا يخرج عنه.

تشمل دورة ستيرلنج الحرارية أربعة إجراءات رئيسية هى:

الإنضغاط – إضافة الحرارة – التمدد – طرد الحرارة.



القس الدكتور : روبرت ستيرلنج

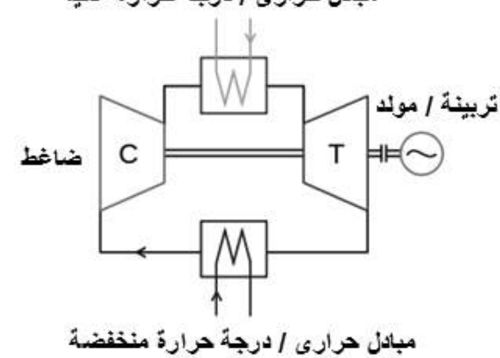


دورة ستيرلنج الحرارية

دورة برايتون (Braton Cycle):

هي دورة ثرموديناميكية تصف عمل التربينة الغازية ،تنسب إلى المهندس المخترع الأمريكي جورج برايتون (1872 **-George Brayton**). تستخدم دورة برايتون في عمل محرك الإحتراق الداخلي مثل المحرك النفاث، كما تطبق على محركات الإحتراق الخارجي.



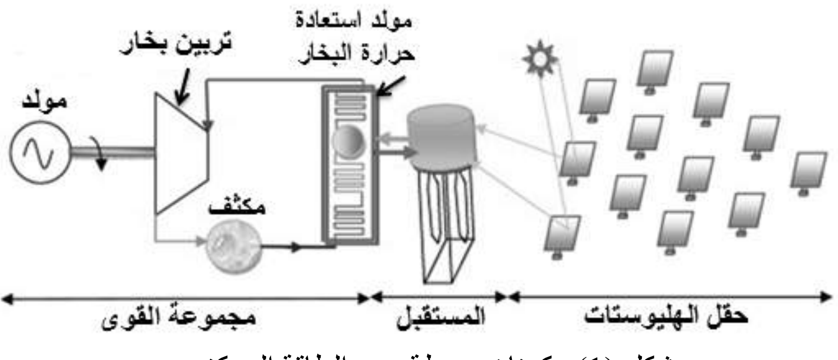


تمثيل ميكانيكي لدورة برايتون المغلقة

الباب الثامن
محطات برج الطاقة المركزي
Central tower power plants

تعرف أيضا بمحطات البرج الشمسي (solar tower plants) أو أبراج الطاقة (power towers) أو محطات طاقة هليوستات (heliostat power plants) هذه التكنولوجيا عبارة عن برج طاقة مركزي محاط بعدد كبير من مصفوفة مرايا (آلاف) قابلة للتتبع على محورين – يطلق على هذه المرايا – الهليوستات (heliostat) (تمثل المجمعات) والتي تعكس الأشعة الشمسيه المباشرة إلى مُستقبِل ثابت في أعلى قمة البرج.

كما توجد على قمة البرج غلاية ضخمه تحتوي على مائع (ملح منصهر مثلا) يتم تسخينه لينقل حرارته من خلال مبادل حراري لإنتاج بخار ماء محمص والذي بدوره يشغل تربينة بخارية وبالتالي تُشغل مولد للحصول على الطاقة الكهربائية. للحفاظ على متغيرات البخار ثابتة، حتى أثناء تغيير الإشعاع الشمسى، أى أن المحطة تتكون من ثلاثة أجزاء رئيسية والموضحة فى شكل (1)



شكل (1) مكونات محطة برج الطاقة المركزي

عموما يمكن استخدام أحد الطريقتين لضمان استمرار الحصول على طاقة كهربية من محطات برج الطاقة :

- تكامل محطة برج الطاقة المركزى مع مصدر احتياطى بالوقود الأحفورى
- استخدام خزان حرارى مع المحطة، والذى يخزن الحرارة لعدة ساعات للمساعدة وتسهيل إنتاج الكهرباء خلال فترة الذروة وفى فترات عدم إتاحة الإشعاع الشمسى

في محطات برج الطاقة:

- تتراوح نسبة التركيز بين 300 إلى 1500 ضعف.
- تصل درجة الحرارة من 800°C إلى 1000°C (وأحيانا تصل إلى 1300°C).
- المقاس النموذجي يتراوح بين $10MW_{el}$ إلى $150MW_{el}$
- كفاءة كلية مرتفعة تصل إلى 29%

تتكون محطات برج الطاقة من الأجزاء الرئيسية الآتية والموضحة بشكل (2) :

حقل هليوستات (heliostat field)

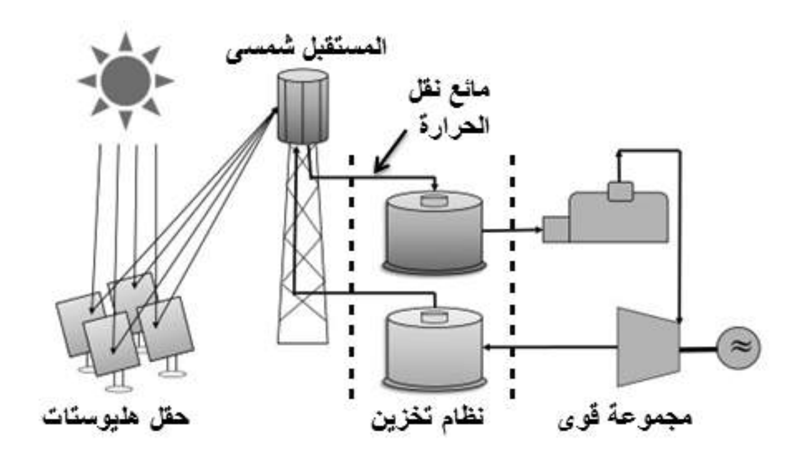
مُستقبل شمسي (solar receiver)

مائع نقل الحرارة (heat transfer fluid)

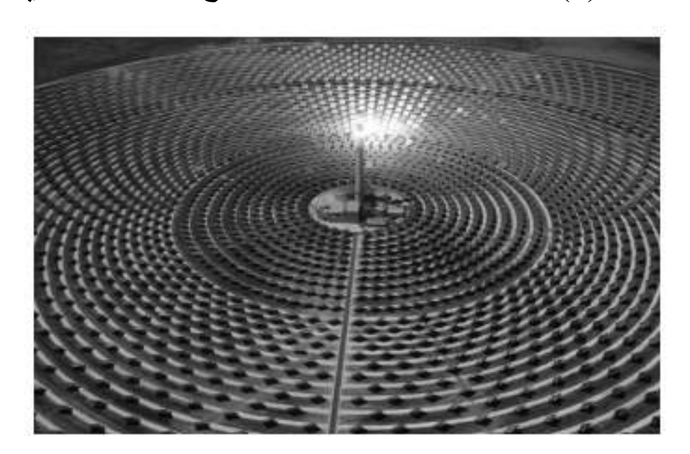
نظام تخزين (storage system)

مجموعه قوى (power block)

يوضح شكل (3) محطة برج الطاقة المركزي (Gema) فى أسبانيا (Wikipedia, 2011)



شكل (2) المكونات الرئيسية لمحطات برج الطاقة المركزي



شكل (3) محطة برج الطاقة المركزي فى أسبانيا(Gema)
(Wikipedia, 2011)

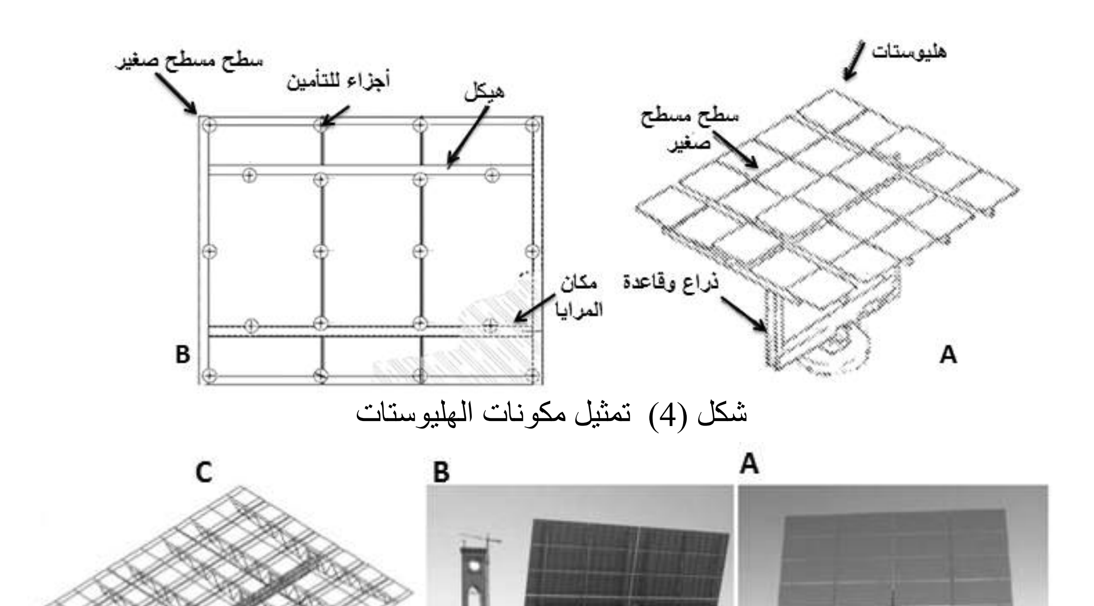
الهليوستات (The Heliostat)

كلمة هيليوس Hēlios من الإغريقية Ἥλιος بمعنى الشمس، عبارة عن اسم إله الشمس في الميثولوجيا اليونانية. وهو ابن التيتان يبريون والتيتان ثيا (وفقا لكتابات هسيود).

عموما تتكون كلمة هليوستات (Heliostat) من كلمتين إغريقيتين هما "هليو" وتعنى الشمس و"ستات" وتعنى ثابت غير متحرك ، وهى عبارة عن معدة تتكون من مرايا مثبتة على محور يتحرك للعمل على مدار الساعة والتي تجعل أشعة الشمس تنعكس في إتجاه واحد وذلك في أنظمة أبراج الطاقة الشمسية.
وتكون المكونات الرئيسيه للهليوستات: سطح عاكس، هيكل وميكانيزم التتبع، نظام تحكم. يكون السطح العاكس أما زجاج و معدن أو غشاء مطاط (stretched membrane) . يتراوح مقاس الهليوستات الواحد من $1\ m^2$ إلى $150\ m^2$
يوضح جدول (1) خصائص نوعين من مساحات الهليوستات الشائعة الاستخدام $49\ m^2$ &$25\ m^2$
يمثل شكل (4-A) تمثيل لمكونات هليوستات، المساحة حوالى $121m^2$ ، مكون من 25 وحدة مرايا مسطحة ، ويوضح شكل (4-B) مكونات تفصيلية لوحدة المرايا
ويوضح شكل (5) هليوستات مساحة $121\ m^2$مستخدم فى محطة PS-10 بأسبانيا(Source: Solucar, 2006) يمثل الشكل الواجهة الأمامية والخلفية والهيكل .
كما يوضح شكل (6) هليوستات مساحة $148\ m^2$ مستخدم فى معامل سانديا بأمريكا (Source: Kolb, 2007)

جدول (1) خصائص نوعين من مساحات الهليوستات شائعة الاستخدام

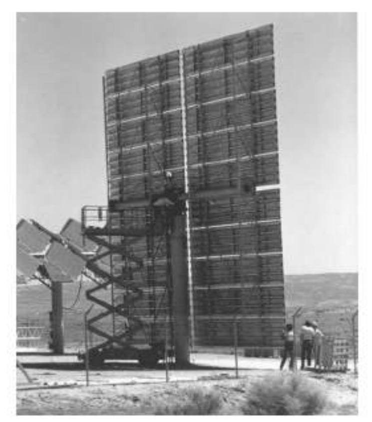
مساحة مرايا الهليوستات	$25\ m^2$	$49\ m^2$
مقاس السطح المسطح الصغير(facet)	2.5 x 2.5 m	1 x 1 m
ارتفاع القاعدة	3.5 m	5 m
نوع زجاج المرايا والسمك	AGC مرايا شمسية، 4 mm	AGC مرايا شمسية ، 4 mm
المادة الأساسية للهيكل	صلب	صلب



شكل (4) تمثيل مكونات الهليوستات

شكل (5) هليوستات مساحة $121\ m^2$ مستخدم فى محطة PS-10 بأسبانيا

(Source: Solucar, 2006)



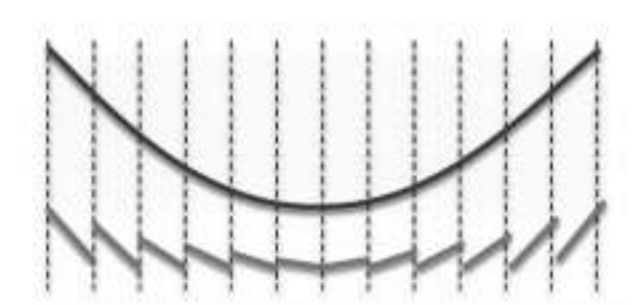
شكل (6) هليوستات مساحة $148\ m^2$ مستخدم فى
معامل سانديا بأمريكا (Source: Kolb, 2007)

اولا : حقل هليوستات:

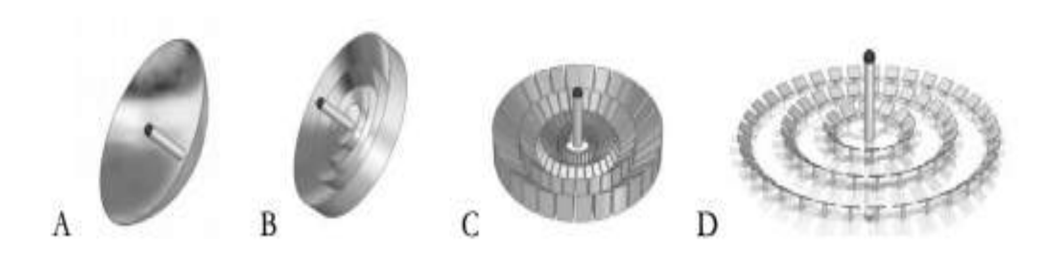
عبارة عن حقل ضخم يصل إلى عدة أفدنة من آلاف المرايا المسطحة أو المقعرة (الهليوستات) الكثيرة.

المرايا تتبع أشعة الشمس كل منفردة على محورين وذلك للإستفادة من الإشعاع المباشر، المحورين هما الإرتفاع (elevation) والسمت (azimuth)، ويتم ذلك عن طريق برنامج تحكم على الحاسب الآلى، بغرض حساب زوايا الميل لكل هليوستات واحد او لمجموعة هليوستات على حدة ،لتحقيق إنعكاس وتركيز للإشعاع المباشر على قمة البرج المركزي.

تستند هذه التكنولوجيا على مفهوم فرسنل (Fresnel)، والموضحة فى شكل (7)، والتي تعني تقسيم مرايا منحنية إلى أجزاء ثم تجميعها على مستوى شاسع، حيث يتكون الهليوستات من مجموعة كبيرة جدا من مرايا مربعة ومسطحة وتشكل بقدر الامكان على شكل مرايا كروية او قطع مكافىء. ولتخفيض ارتفاع القطع المكافىء وبالتالى تحسين خصائص الأيرو ديناميكى (aero – dynamical) للهليوستات بالإضافة إلى بساطة التصميم الميكانيكى، ويعتمد شكل تجميع المرايا على ارتفاع البؤرة (focal) بينما ارتفاعها يعتمد على المسافة بين الهليوستات والمُستقبل. كما أن شكل (8) يوضح التطور بداية من الحل المتماثل البسيط لتجميع الأشعة الشمسية في نقطة المركز، إلى حل غير متماثل أكثر تعقيدا، والذي يضمن قدرا كبيرا من الحل الأمثل للمشاكل. والهدف من هذا إستخدام مواد أكثر كفاءة مع تقليل التكاليف، ومراعاة الفكرة الأساسية وهي تركيز الأشعة الشمسية في النقطة المركزية.



شكل (7) أساسيات مرايا فرسنل – قسمت المرايا المنحنية إلى مرايا مسطحة (Nussbaumer, 2011)



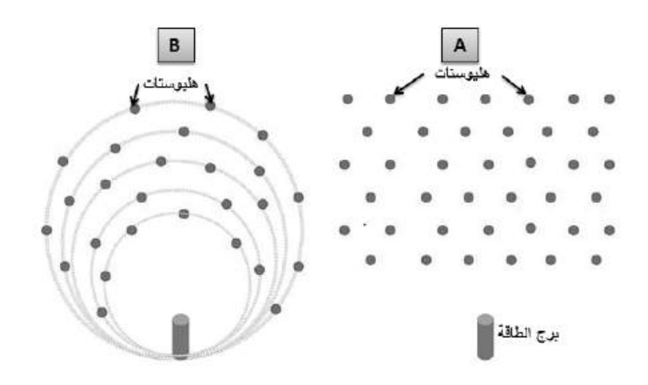
شكل (8) تطور تكنولوجيا محطات برج الطاقة

يوضح شكل (8-A) أبسط الحلول بإستخدام طبق قطع مكافئ يوجه مباشرة إلى الشمس . ولتخفيض كمية دعائم الهيكل وكذلك تقليل الإرتفاع يُحول الطبق إلى مرايا فرسنل والموضحه بشكل(8-B). بإضافة مُستقبل ثابت ونظام تتبع لجوانب المرايا تقل كمية دعائم الهيكل ويصبح النظام أكثر قوة كما في شكل (8-C). ويعتبر النظام المثالي والذي يمتاز بالحد من الآثار السلبية للتظليل من خلال زيادة المسافة بين المرايا مع تصميم قياس المرايا ،وهذا موضح في شكل (8-D).

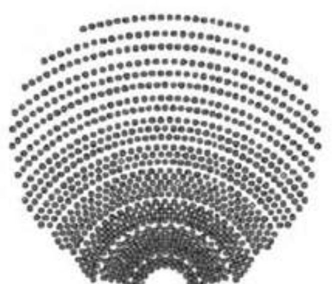
يكون الهدف من هذا التطور هو تحسين تصميم المرايا من حيث الحجم والوزن والأداء مع مراعاة أن تكون التكاليف إقتصادية.ويصنف الحقل الشمسى طبقا لترتيب الهليوستات إما على شكل صفوف طولية متوازية
كما فى شكل (9-B) أو على شكل إشعاعى كما فى شكل (9-A) وفيما يلى توضيحا لذلك.

يوجد نوعان من إتجاه الحقل الشمسي (وبالتالى نوعين من المُستقبل) هما:
مُستقبل دائرى (Circular receiver)
أو حقل محيط (Surround field)
يكون الحقل المحيط في شكل دائري تقريبا وتوزع الهليوستات حول البرج كما فى شكل (10).
مُستقبل واحد (One receiver)
أو حقل شمالى / جنوبى (Northern or Southern field)

يوزع الحقل شمالى/جنوبى، أى أن جميع الهيلوستات إما شمال أو جنوب البرج كما فى شكل (11) .



شكل (9) ترتيب الهليوستات

شكل (10) مُستقبل دائرى (الحقل المحيط)
Source Torresol Energy (Gemasolar)




شكل (11) مُستقبل واحد (حقل شمالى أو جنوبى)
Source Abengoa (SP20)

كذلك يصنف تكوين الحقل كالأتى :

- تكوين شعاعى (Radial configuration)

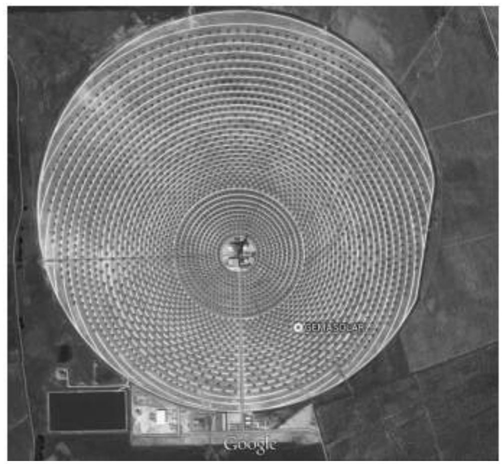
وهو ما عرف فى شكل (10) حقل محيط وشكل (11) حقل شمالى أو جنوبي، بالإضافة إلى الأمثلة الموضحة بشكل (12) & شكل (13)

- تكوين حقل الذرة (Cornfield configuration)

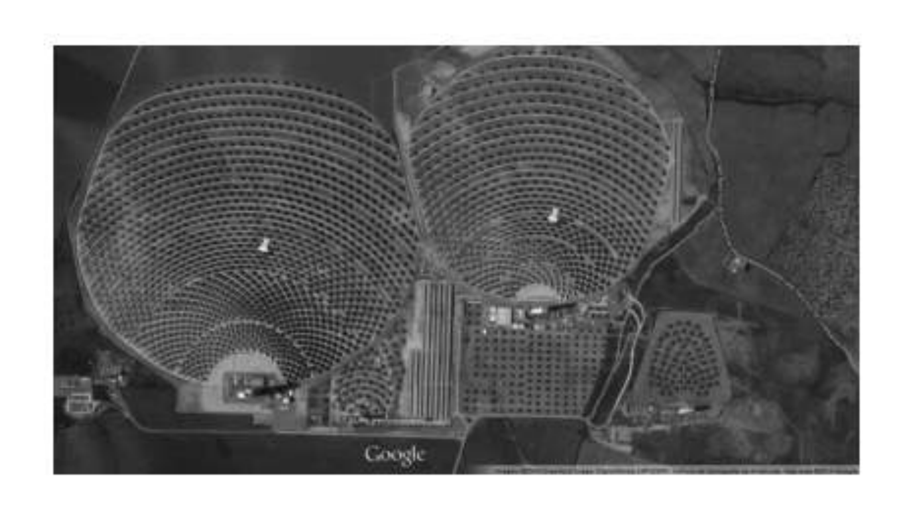
الإسم يشير إلى المقصود وهو أن الهليوستات مرتبة على شكل صفوف طولية متوازية خلف بعضها

يوضح شكل (14) حقل هليوستات فى شكل صفوف طولية، محطة Sierra (أمريكا)

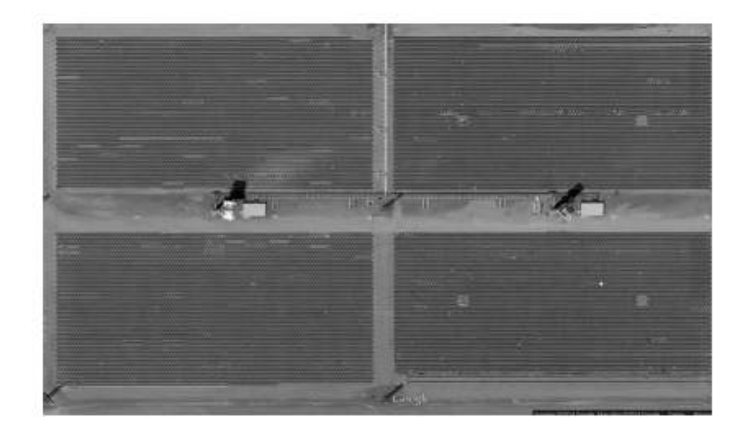
ويوضح شكل (15) حقل هليوستات فى شكل صفوف طولية، محطة Julich (ألمانيا)



شكل (12) حقل هليوستات شعاعى محطة Gemasolar (أسبانيا)



شكل (13) حقل هليوستات شعاعى محطتى PS10 &PS20 (أسبانيا)



شكل (14) حقل هليوستات فى شكل صفوف طولية، محطة Sierra (أمريكا)



شكل (15) حقل هليوستات فى شكل صفوف طولية، محطة Julich(ألمانيا)

المفقودات (Losses)

تتعرض الأشعة الشمسية لمفقودات بصرية (optical losses) متغيرة قبل وصولها إلى المُستقبل. وتمتاز محطات برج الطاقة المركزى بالكفاءة البصرية العالية، فمثلا فى المحطات القائمة بأسبانيا:

الكفاءة = 77 %

متوسط الكفاءة = 64 %

ويوضح الشكلان (16)& (17) أنواع المفقودات البصرية لحقل هليوستات والتى تعرف كالآتى:

- **فقد جيب التمام (cosine losses)**

تعتبر كفاءة جيب التمام (cosine efficiency) للهليوستات هي الأكبر تأثيرا على تحديد ترتيب حقل الهليوستات. وتعتمد هذه الكفاءة على كل من موضع الشمس ومكان كل هليوستات بالنسبة إلى المُستقبل.

كما تستخدم آلية التتبع لوضع الهليوستات بحيث يكون سطحها هو قوس الزاوية بين الأشعة الشمسية والأشعة المنعكسة من الهليوستات إلى المُستقبل. وينخفض تأثير المساحة المنعكسة للهليوستات بجيب تمام (cosine) نصف هذه الزاوية، ويعرف هذاالتاثير بفقد جيب التمام .فى شكل (18) تم تمثيل تأثير هذا الفقد على

أكثرمن هليوستات حيث يتعرض الهليوستات A لمفقودات جيب التمام المؤثرة (هامة) بينما تتعرض الهليوستات B لمفقودات جيب التمام صغيرة جدا وغيرمؤثرة (مهملة)

- **فقد التظليل (shadowing loss)**

يرجع فقد التظليل إلى الظل الناتج من الهليوستات المجاورة في الحقل.

- **فقد الإعاقة (blocking loss)**

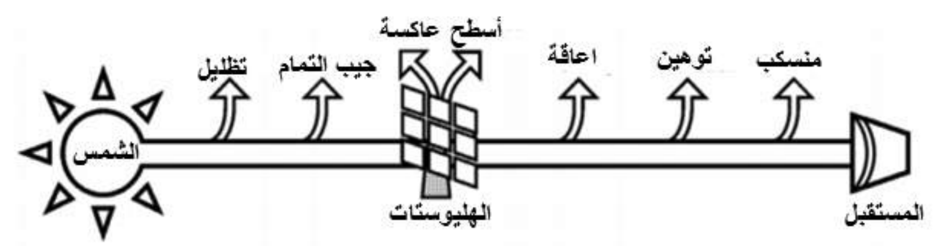
يرجع هذا الفقد إلى تأثير منع الإشعاع من أحد الهليوستات إلى المستقبل عن طريق هليوستات آخر

- **فقد التوهين (attenuation loss)**

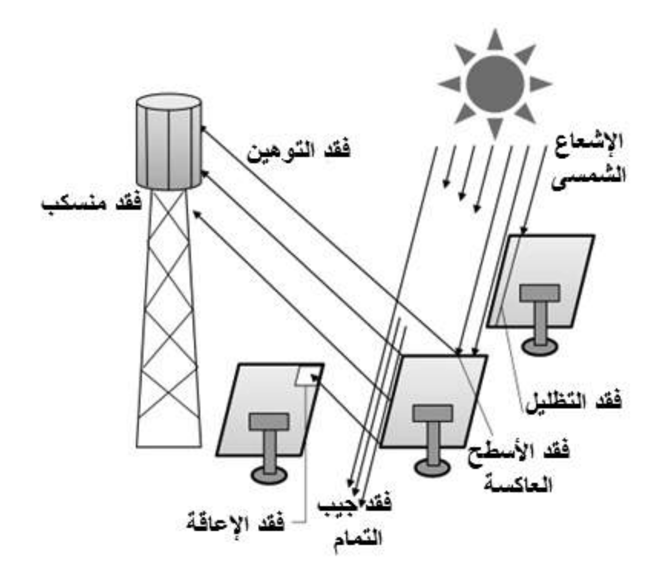
يحدث هذا الفقد نتيجة جزيئات الأتربة في مسارات الإشعاع إلى المستقبل

- **فقد منسكب (spillage loss)**

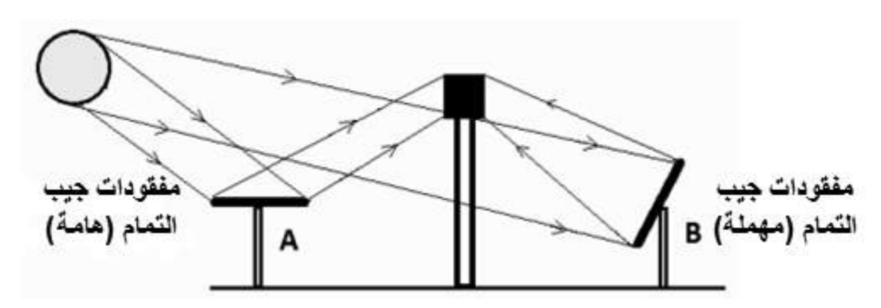
ينتج هذا الفقد نتيجة عدم وصول (ضبط) الأشعة المنعكسة من الهليوستات إلى المُستقبل ،وهذا يحدث إذا كانت الصورة المنعكسة للهليوستات أكبر من فتحة المُستقبل (aperture).



شكل (16) تصنيف أنواع المفقودات البصرية لحقل هليوستات



شكل (17) تمثيل أنواع المفقودات البصرية لحقل هليوستات



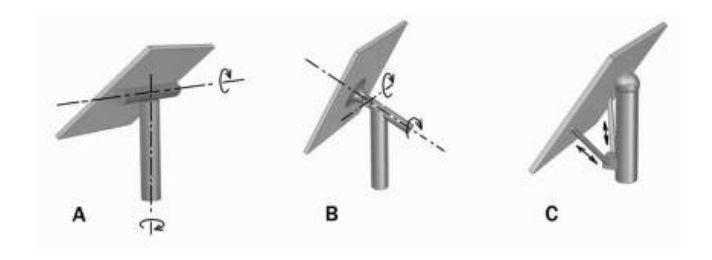
شكل (18) فقد جيب التمام على أكثرمن هليوستات

تصنيف التشغيل الميكانيكى للهليوستات:

يصنف التشغيل الميكانيكى للهليوستات إلى: توالي أو توازي إعتمادا على تركيب المشغلات (actuators). [المشغل: يعرف في مجالات التحكم الإلكتروني، بأنه آلية لتنشيط معدات التحكم والتشغيل بإستخدام إشارات إلكترونية].

هليوستات من نوع التوالي (serial types of heliostats)

في هذه النوعية تركب المشغلات متسلسلة كما في شكل (19-A) والذي يوضح نوع مُشغل إرتفاع /سمت (azimuth - elevation)،بينما يوضح شكل (19-B) هليوستات ضبط محور كهدف (target aligned heliostat) ومميزات هذا النوع : تصميم بسيط وتحكم بسيط . بينما العيوب تتلخص في إنخفاض الإستقرار.تكون أكثر التصميمات الشائعة عبارة عن عمود مثبت في أعلى نقطة به وحدة محرك تحتوي على وسيلة إدارة إرتفاع وأخرى لإدارة سمت. ثم يثبت أنبوب عزم الدوران (torque) (أنبوب طويل من الصلب) على وحدة المحرك ،والذي يكون له محور إرتفاع متساوي.توصل المرايا الزجاجية مع أنبوب عزم الدوران على دعامات هيكل الجمالون والذي يكون متعامدا مع محور الإرتفاع. في الهليوستات كبيرة الحجم، يتم إستخدام شبكة ثانية (وممكن في النهاية تستخدم شبكة ثالثة) من الحزم بين المرايا الزجاجية والدعامات.



شكل (19) أنواع ميكانيزم تشغيل الهليوستات

هليوستات من نوع التوازي(parallel types of heliostat) :

يحتوي هذا النظام على الأقل على مشغلين متصلين بكل من وحدة المرايا والأرض في نفس الوقت،كما في شكل (19-C). ومن مميزات هذا النوع زيادة الإستقرار . يصمم نظام التحكم للتعامل مع دوائر مغلقه آلية، حيث توجد أكثر من طريقة للحركة بين الأرض والمرايا.

فيما يلي أنواع هليوستات التوازي:

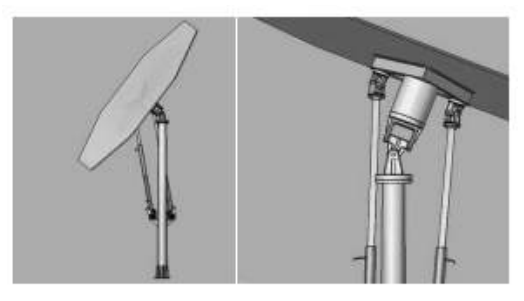
- **متعقب شمسي عام (universal solar tracker)**

يوضح شكل (20) هذا النوع، وهويتكون من مشغلين خطيين وعدد 5 وصلة (مِفصل) (joint) عامة، تثبت المُشغلات على مستوى مائل لكي تشكل الوصلات

على شكل مثلث . يكون المفصل العام عبارة عن زنبرك وصمولة موضوعا على السطح.

- **سداسية القوائم ذو ثمانية الأسطح (octahedral hexapod)**, والموضح فى شكل (21)

ويوضح شكل (22) تمثيل للتشغيل الميكانيكى للهليوستات

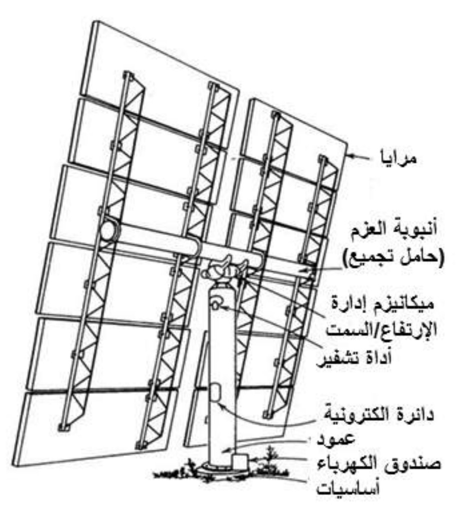


شكل (20) متعقب هليوستات من نوع التوزاي
(Source: Orshan, 2010)





شكل (21) متعقب سداسي القوائم ذو الثمانية أسطح
(Source: Wikipedia, 2013 @ Physik Instrument, 2013)



شكل (22) تمثيل للتشغيل الميكانيكى للهليوستات

مواد المرآيات:

إن المطلوب الرئيسي من مواد المرايات المناسبة هوتحقيق خصائص الإنعكاس . فيجب أن تكون الإنعكاسية (reflectivity) عالية. وتعرف الإنعكاسية لسطح ما،بأنها الرقم الذي يشير إلى جزء الإشعاع الساقط والذي ينعكس بواسطة السطح.

عموما تختلف الإنعكاسية تبعا لأطوال الموجات ، ولذا فهي تعرف عند طول موجه معطاه (محددة) أو عند مدى موجة محددة ،وللحظة مدى الضوء المرئي.

وتمتاز المرايا بالآتي :

- انعكاسية عالية (% 96 / 90)
- خفيفة الوزن (سهولة التداول)
- كفاءة التيبس (القساوة) stiffness (أقل تدهور في المرايات عند التعرض لأحمال ديناميكية)
- المتانة
- أخطاء طيفي منخفض

على وجه العموم، فإن الإنعكاسية الموزونة للشمس (solar weighted reflectivity) تشير إلى أنه يؤخذ في الإعتبار وجود محتوى طاقة مختلف عند أطوال موجات مختلفة في الطيف الشمسي .

وعليه فإن الإنعكاسية الموزونة للشمس تشير إلى جزء طاقة الشمس التي تنعكس على المرآة.

ويصنف الإنعكاس كالآتى:

- **إنعكاس مرآوي (specular reflection)**

وهو الضوء الذي يأتى من أتجاه مدخل أحادى ينعكس إلى أتجاه مخرج أحادي وطبقا لقانون الإنعكاس فإن كل من أتجاه المدخل الأحادي وإتجاه المخرج الأحادي يكون لهما نفس الزاوية بالنسبة للسطح العادي للمرآة.

- **إنعكاس مشتت (diffuse reflection)**

في المقابل، فإن الضوء الداخل ينعكس في مدى إتجاه واسع.

في تطبيقات CSP، يؤخذ في الإعتبار فقط الإنعكاس المرآوى ،لأن الإشعاع المنعكس يجب أن يكون له اتجاه محدد. ويكون معيار جودة المرايات هوارتفاع "إنعكاس مرآوى موزون للشمس" (solar weighted specular reflectivity)

أنواع المرايات (Mirrors)

يوجد نوعان هما:

1- مرايات زجاجية مسطحه قياسية (standard flat glass mirror) أو (flat- glass heliostat)

يكون سمك المرايا 1-4mm وتحتوي على طبقة عاكسة في الخلفية. تتم حماية طبقة العاكس ضد إنخفاض درجتها (degrading) ، إما بإضافة طبقة زجاج خلف الطبقة الأساسية (والتى تكون على شكل شرائح)، أو دهان الخلفية بمادة دهان كحماية . يمكن أن يكون الزجاج بإنحناء بسيط سهل على طول محور واحد.ويوضح شكل (23) هليوستات من مرايات زجاجية معدنية مسطحة قياسية.

2- مرايا نسيج غشائي متمدد (SM)(stretched membrane mirror) أو (SM heliostat)

ظهر هذا النوع في عام 1980 ويتركب من نسيج غشائي مرن مصنوع من الألومنيوم أو الصلب ستنلس ،وتكون المادة العاكسة ثابتة ،يتم ضبط شد النسيج الغشائي بواسطة مضخة تفريغ / مروحة (vacuum pump/ fan) أو محرك خطي ميكانيكي (mechanical linear actuator)وعلى ذلك فلن يتغير طول ارتفاع التركيز (البؤرة).

وتوجد مقاسات مختلفة لهليوستات النسيج الغشائي المتمدد (SM – heliostats) :

وتتراوح نماذج القياس بين $50\text{-}150\ m^2$ ، والتي من الشائع أن تكون على شكل دائري. ويكون هيكل التثبيت أخف لأن الهليوستات وزنها خفيف. ويصل وزن الهليوستات SM إلى حوالي نصف وزن هليوستات الزجاج المسطح. حيث يوضح شكل (24) هليوستات مرايا نسج غشائي متمدد.

ويلاحظ أن تكاليف هليوستات SM أعلى من هليوستات الزجاج المسطح بحوالي 20%



شكل (23) هليوستات من مرايات زجاجية معدنية مسطحة قياسية
Source: (GEEN 4830-ECEN 5007)




شكل (24) هليوستات مرايا نسج غشائي متمدد
(Source: GEEN 4830-ECEN 5007)

مادة الزجاج :

إن المرايا الزجاجية هي الاختيار القياسي. ويوضح جدول (2) أنواعا من مقاومات المرايا الزجاجة الشمسية وحدود قيمها، كذلك يوضح جدول (3) خصائص وبيانات المرايا الزجاجية الشمسية

جدول (2) مقاومات الزجاج (Source:Froling,2011)

المقاومة	حدود القيمه Mpa
مقاومة الانضغاط	880-930
مقاومة الشد	30-90
مقاومة الانحناء	30-100

جدول (3) بيانات مرايا شمسية زجاجية (Source:AGC solar,2012)

النوع	الوحده	القيمه
السمك	mm	4
الوزن النوعي	Kg/m²	10
الكثافه عند 18 °C	Kg/m²	2500
الانعكاسية	%	93.6
معامل التمدد الحراري (α)	$/k10^{-6}$	9
المقاومة الميكانيكية	M Pa	45
نسبة بواسيون		0.2
معامل يونج	G Pa	70

تعريفات :

- مقاومة الشد (Tensile Strength) هى أعلى قيمة للإجهاد (الإجهاد الهندسى) في منحنى الإجهاد و الانفعال وتساوى أعلى حمل شد تحملته العينة أثناء اختبار الشد مقسوما على مساحة المقطع الأولية. وتقاس مقاومة الشد بـ كجم/مم^2 أو نيوتن/مم^2 (= مليون بسكال) .
- مقاومة الانضغاط (Compressive Strength) هي مقدرة المادة على مقاومة القوى الضاغطة محوريًا وعند الوصول إلى حدود مقاومة الانضغاط، تتحطم المادة.
- قوة الانحناء (Bending Strength) ، هي خاصية المادية، وتعرف بأنها الإجهاد في مادة قبل أن ينتج في اختبار الثني.
- المقاومة الميكانيكية (Mechanical Strength) في ميكانيكا المواد، مقاومة المادة هي قدرتها على تحمل الحمل المطبق دون فشل أو تشوه
- نسبة بواسون (Poisson's ratio) هي نسبة إجهاد الانكماش المستعرض إلى إجهاد التمديد الطولي في اتجاه قوة التمدد.
- معامل يونج (Young's modulus) هو مقياس للمرونة، وهو نسبة الإجهاد الواقع على المادة إلى الإجهاد الناتج.

- MPa = Megapascal
  = 1000000 N/ m²   = 10 bar

فيلم مرايا (mirror film):

أنتجت شركات 3M الأمريكية فيلم مرايا شمسي أطلق عليها Solar Mirror Film 1100 له إنعكاسية 94%، في أحد التطبيقات التي تمت منذ 1995 تلاحظ إنخفاض حوالي 3% في نسبة الإنعكاسية بعد 15 سنه تشغيل . الفيلم مصنع من (acryl) وبسمك 0.117mm

يتم وضع الفيلم على مادة بإستخدام غراء . ومن المشكلات التي ظهرت عن ما هي المادة المناسبة الأفضل من المرايات الزجاجية والتى يكون لها سطح صلب (جامد) ومسطح . وتوصي شركات 3M بإستخدام زجاج أو ستانلس ستيل أو ألومنيوم مدهون. ولا يوصى بعمل نظافة بالغسيل تحت ضغط أو عمل فرك لسطحها. ويوضح شكل (25) هليوستات فيلم مرايا شمسي.



شكل (25) هليوستات فيلم مرايا شمسي
(Source: SunShot 3M)

ثانيا : المُستقبل الشمسي (solar receiver)

يعرف المُستقبل أيضا بـ مبادل حرارى عالى التقنية high-tech) heat exchanger) والذى يعمل على تسخين الملح المنصهر أو المائع عند درجة حرارة حوالى°250 C المدفوع من الخزان البارد الى 565° C والذى يندفع الى الخزان الساخن. عند احتياج الشبكة العامة إلى الطاقة الكهربائية، يستعان بمحطة برج القوى المركزى من خلال ضخ الملح الساخن إلى نظام إنتاج البخار والذى بدورة ينتج البخار المحمص لمجموعة التربينة / المولد، ثم يعود الملح إلى الخزان البارد وينتظر لاعادة تسخينة فى المستقبل حتى تستكمل الدورة ويوضح شكل (26) هذه الدورة.

يوجد عدة أنواع من المُستقبلات الشمسية, والموضحة فى شكل (27)، هي:

ا- مُستقبلات أنبوبية (tubular receiver)

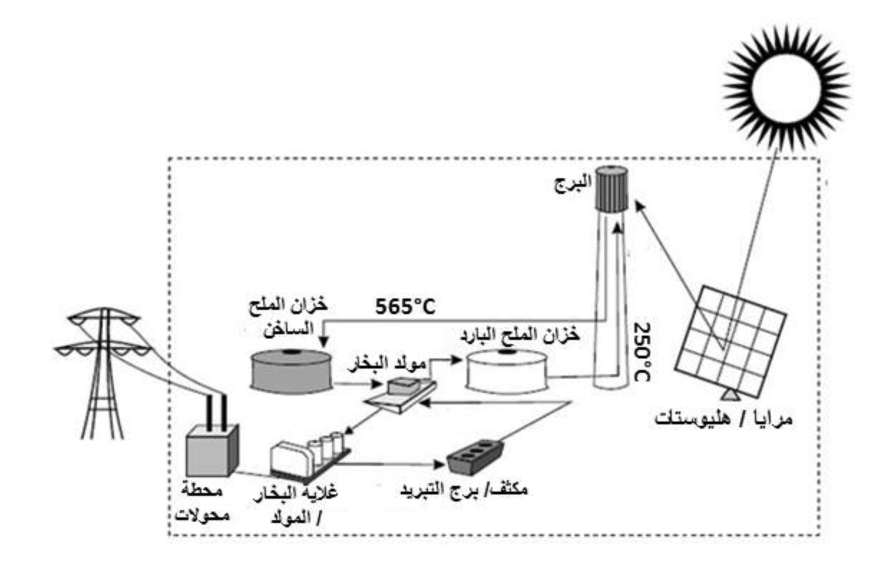
- مُستقبل خارجي (external receiver) والموضح بشكل (28)
- مُستقبل مجوف (cavity receiver)

ب – مُستقبلات حجمية (volumetric receivers)

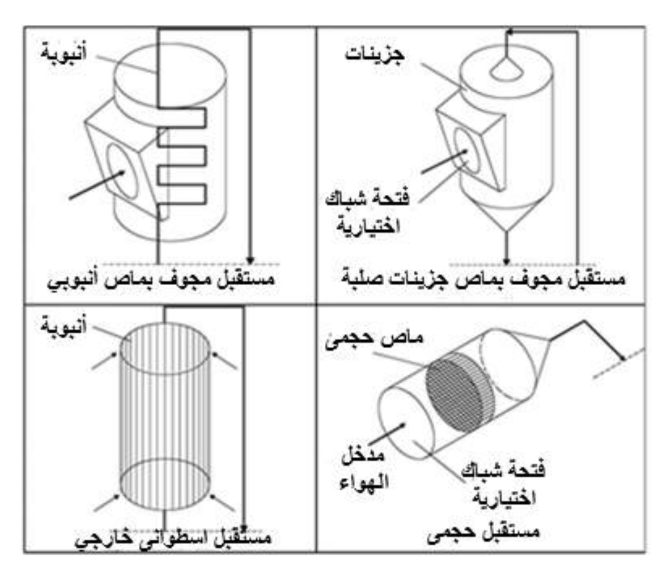
- مُستقبل هواء حجمي مفتوح (open volumetric air receiver)
- مُستقبل هواء مضغوط (pressurized air receiver)

ج – مُستقبلات جزيئات صلب (solid particle receiver)

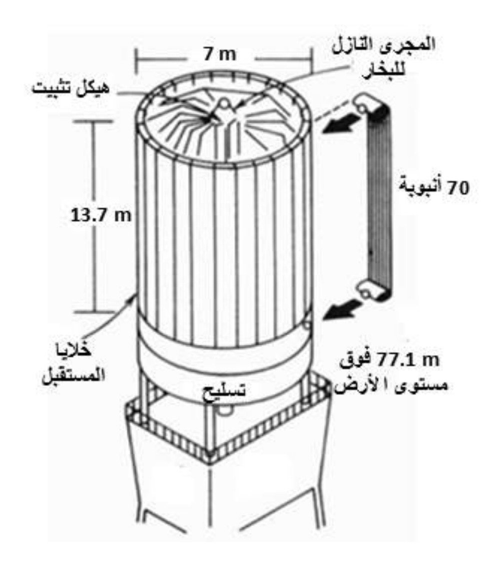
تعتبر المُستقبلات الأنبوبية هي الأكثر شيوعا تجاريا سواء النوع الخارجي أو المجوف.



شكل (26) تمثيل مكونات برج قوى مركزى بملح منصهر كمائع



شكل (27) أنواع المُستقبلات الشمسية



شكل (28) مُستقبل خارجى

يؤثر نوع المُستقبل مباشرة في شكل الحقل الشمسي. تتوافق المُستقبلات الخارجية مع نوع الحقل الشمسي المحاط بالمُستقبل بينما تتوافق المُستقبلات المجوفة مع الحقل الشمالي أو الجنوبي. في حالة المُستقبلات الخارجية، فإن كل الأسطح الخارجية لأنابيب الإمتصاص تتعرض للحقل الشمسي ،بينما في المُستقبلات المجوفة تكون أنابيب الإمتصاص داخل التجويف . يدخل الإشعاع إلى التجويف من خلال فتحات فتحة المُستقبل (aperture)، ليصطدم بسطح أنبوب الإمتصاص. وتنخفض المفقودات الحرارية في المُستقبلات المجوفة مقارنة بالمُستقبلات الخارجية . لأن المُستقبلات المجوفة تحجز الأشعة الشمسية المركزة الداخلة ،فإن الفقد المنسكب يكون أعلى، مقارنة بالمُستقبلات الخارجية.
فيما يلي أنواع مائع التشغيل المستخدم في المُستقبل :

- مياه /بخار (water/ steam)
- هواء (air)
- أملاح منصهره (molten salts)
- صوديوم (sodium)

إعتمادا على نوع مائع التشغيل وتصميم المُستقبل، يمكن أن تصل أقصى درجة حرارة تشغيل إلى :

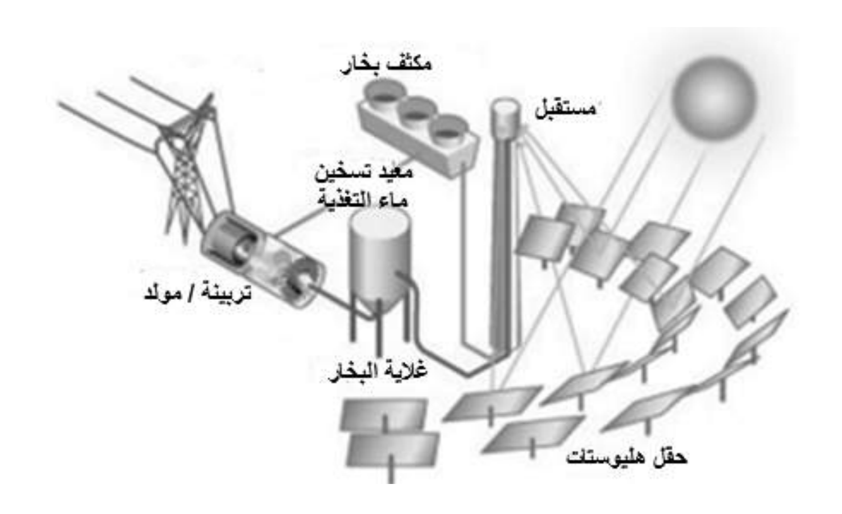
- ❖ من 25°C إلى 300°C عند إستخدام مياه/ بخار
- ❖ إلى 390°C عند إستخدام الزيوت المصنعة
- ❖ إلى 565°C عند إستخدام الأملاح المنصهرة
- ❖ يمكن الوصول إلى 800°C عند إستخدام الغازات

مستوى درجة حرارة مائع تحويل الحرارة يحدد حالة تشغيل دورة البخار في مجموعة القوى.

أ. نظام مستقبل بمائع بخار/مياه

يوضح شكل (29) هذا النظام، حيث تستخدم المياه كمائع نقل حرارة. فيوجد في المُستقبل نفسه إنتاج بخار مباشرة. ولذا فإن الميزة الرئيسية لهذا النظام إنه لا يحتاج إلي مبادل حراري، هذا إذا كان النظام بدون تخزين ، وعيوب هذا النظام الاتي :

- ▪ حدود أقل أقصي فيض للمُستقبل من 300 الي $600\ kw/m^2$
- ▪ تكون الطاقة المخزنة في صورة بخار عالي الضغط غير اقتصادية، لذا يجب تحويل الطاقة إلي وسط آخر مع مبادلات حرارية والتي تسبب فقد طاقة أعلي .
- ▪ يضيف تغير المرحلة في مائع نقل الحرارة قيود إضافية عند تصميم المُستقبل ، والتي تؤدي إلي تأثير سالب علي الكفاءة
- ▪ في أوائل استخدام المحطات الشمسية المركزية ، استخدم خزان صخر بترولي (oil/rock) منحدر حراري (تدرج حراري سريع). وأقصي حد لدرجة حرارة الزيت هي 315° C . وبالتالي فإن البخار الخارج من الخزان له درجة حرارة منخفضة وكفاءة كلية منخفضة للتربينة.



شكل (29) نظام مُستقبل بمائع بخار/مياه

ب. نظام مُستقبل بمائع ملح منصهر :

يوضح شكل (30) هذا النوع ، يعتبر الملح المنصهر مفيد وجذاب كمائع نقل الحرارة نظرا لإنخفاض التكاليف واتاحته الاقتصادية. فيما يلي بعض ملامح هذا النظام:

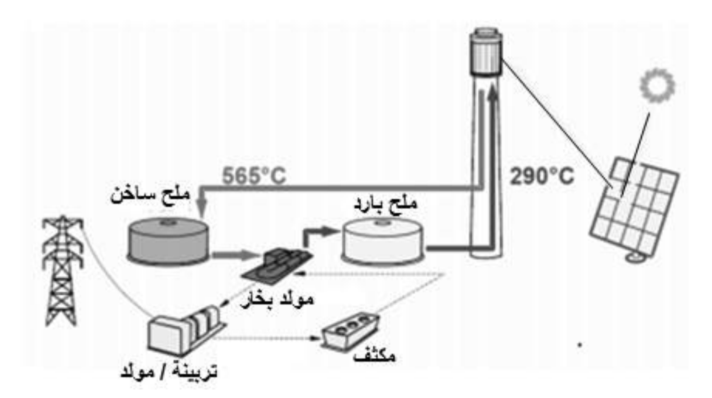
- حدود أقصي فيض للمُستقبل أعلي مقارنة بنظام مياه/بخار

  (من 600 الي 800 kw/m²)

- خبرة عملية أكثر من 40 سنة في مجال موائع نقل الحرارة
- خلال فترة زمنية طويلة لم يحدث سموم ولا استقرار زائد وذلك حماية للبيئة وارتفاع الحرارة
- الملح المنصهر أرخص من الصوديوم من 2 الي 3 مرات
- يكون فى الصورة السائلة عند الضغط الجوى
- درجة حرارة تشغيل متوافقة مع تربينات البخار (حرارة عالية وضغط عالى)
- غير قابل للإشتعال

- تصنع المواسير والصمامات والخزانات المستخدمة فى دورة الأملاح الساخنة من ستينلس ستيل (مقاوم للصدأ)، بينما فى أنظمة الملح البارد فتصنع من الصلب الكربونى المعتدل.

يوضح جدول (4) خصائص مُستقبلات مياه/ بخار، ملح منصهر



شكل (30) نظام مُستقبل بمائع ملح منصهر

جدول (4) خصائص مُستقبلات مياه/ بخار، ملح منصهر

المتغيرات	الوحدة	مُستقبل مياه/ بخار	مُستقبل ملح منصهر
درجة حرارة المخرج	(°c)	230 / 525	566
الفيض الساقط	(kw/m^2)	350	550
أقصى فيض	(kw/m^2)	700	800
أقصى ضغط	(bar)	100 – 135	-
الكفاءة الحراريه	(%)	80 - 93	85-90

ج. نظام مستقبل بمائع صوديوم سائل

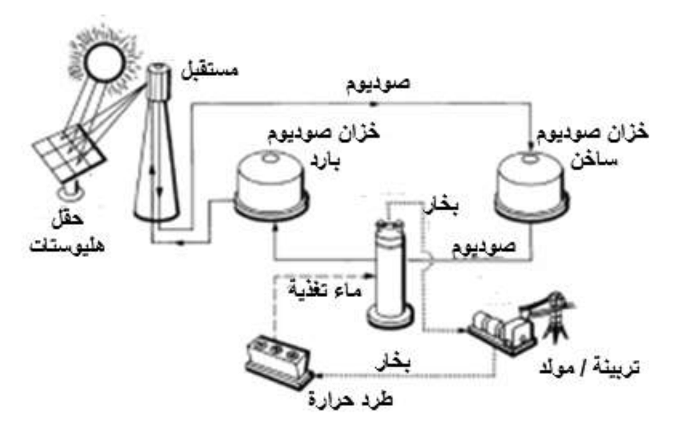
يبين شكل (31) هذا النظام ، يمتاز الصوديوم بخصائص نقل حرارة جيدة جدا، وله مفقودات حرارية منخفضة نتيجة صغر مساحة المستقبل.

مقارنة مع الملح المنصهر تظهر المميزات الآتية للصوديوم السائل:

- موصولية حرارية عالية (conductivity) عند تشغيل المُستقبل من فيض شمسي عالي (أعلي من $1500 kw/m^2$)
- درجة تجمد الصوديوم عند 100°C والتي تقل مرتين مقارنة بالملح المنصهر
- للصوديوم درجة غليان عالية873°C والتي تسمح للتشغيل في درجات الحرارة العالية لدورة قوي بريتون (Brayton power cycle)
- ينخفض كل من حجم المُستقبل والمفقودات الحرارية نظرا لفيض التشغيل العالي وكفاءة المستقبل الأفضل

ولكن يوجد العديد من العوامل والتي تمثل عائق لمُستقبلات الصوديوم لتنتشر اقتصاديا، من هذه العوامل:

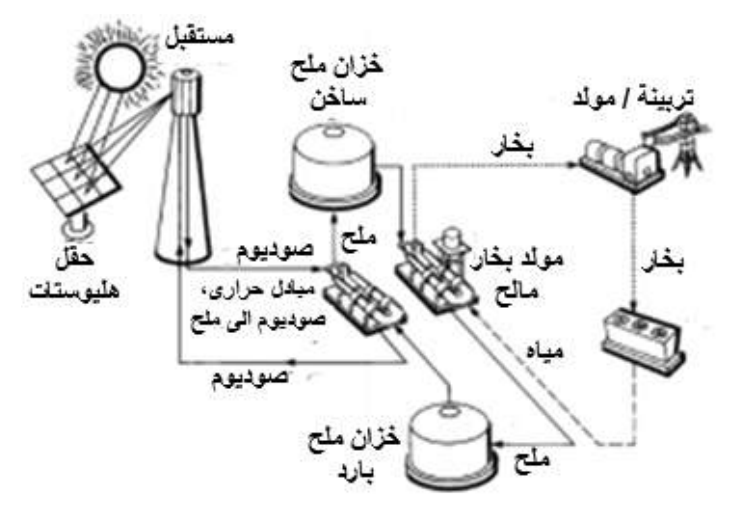
- نتيجة للارتفاع النسبي للتكاليف وانخفاض الحرارة النوعية (specific heat) للصوديوم فإن ذلك يحد من استخدامه كوسط تخزين حراري حساس.
- انخفاض السعة الحرارية الجمعية للصوديوم تؤدي إلى كبر حجم الخزان وارتفاع التكاليف
- ارتفاع الطبيعة غير الفعاله للصوديوم والمياه تؤخذ في الاعتبار عند التصميم تجنبا للمخاطر المرتفعة.



شكل (31) نظام مُستقبل بمائع صوديوم سائل

د. نظام مستقبل بمائع ثنائي صوديوم/ملح (Sodium/Salt Binary)

يبين شكل (32) هذا النوع . يستخدم الصوديوم كمائع في المُستقبل بينما يستخدم الملح كمائع تخزين في النظام. حيث يستفاد من المميزات الجذابة في كلا المائعين ولكن في هذه الحالة يحتاج النظام لإضافة مسار آخر لنقل الحرارة والذي يؤدي إلي تعقيد النظام. وتقل مخاطر حرق الصوديوم لأنه مفيد داخل البرج المسلح



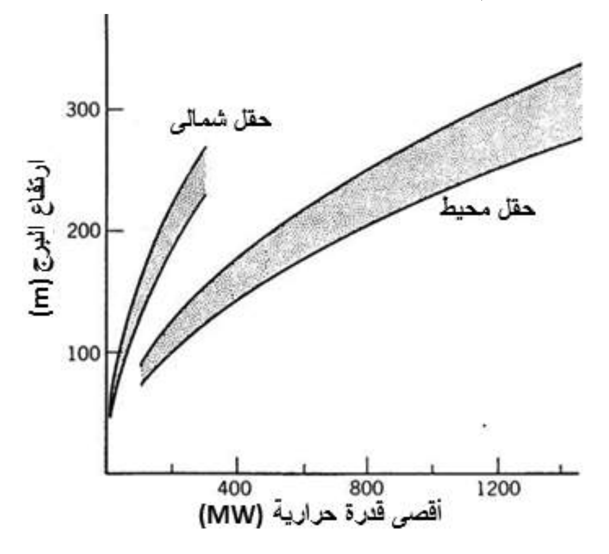
شكل (32) نظام مُستقبل بمائع ثنائي صوديوم/ملح

ثالثا: البرج الشمسى (Solar Tower)

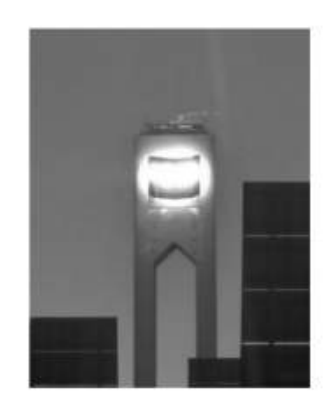
يعتمد ارتفاع البرج على القدرة الحرارية المستقبلة لمحطة برج الطاقة المركزي ويتأثر الارتفاع بنوع الحقل الشمسى : حقل محيط أو حقل شمالى / جنوبى. ويوضح شكل (33) العلاقة بين الارتفاع المثالى للبرج طبقا لنوع الحقل الشمسى ومستويات القدرة الحرارية المختلفة للمُستقبل (Receiver thermal power) غالبا يتراوح ارتفاع البرج من 50 الى 150 متر ويكون بتلك الارتفاعات حتى تستطيع جميع مرايا الهليوستات أن تعكس الأشعة إلى المُستقبل (المركب بأعلى البرج) دون أن تحجب الأشعة بعضها البعض. تزيد استثمارات البرج كلما زاد الارتفاع. يوجد نوعين من الأبراج الشمسية هما:

- البرج الخرسانى (concrete tower)
- البرج الصلب (steel frame tower)

يوضح شكل (34) برج شمسى خرسانى وآخر صلب (مُستقبل خارجى ومُستقبل مجوف)



شكل (33) العلاقة بين الارتفاع المثالى للبرج طبقا لنوع الحقل الشمسى ومستويات القدرة الحرارية المختلفة





شكل(34) برج شمسى لمُستقبل خارجى ومُستقبل مجوف

عند تصميم البرج الشمسى يوصى بالاتى:

- للبرج الصلب يكون الارتفاع أقل من 120 m
- للبرج الخرسانى يكون الارتفاع أكبر من 120 m

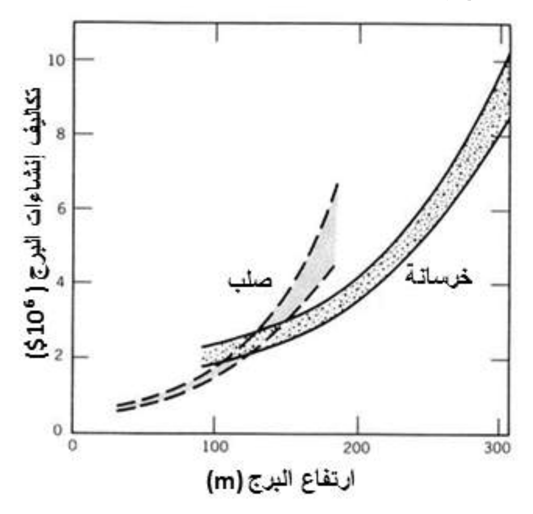
أيضا يوجد عاملان يؤثران على تصميم البرج هما: وزن المُستقبل ومنطقة الرياح، وفى بعض المناطق المعرضة للزلازل يجب أن يؤخذ ذلك فى الإعتبار. يتأثر وزن وحجم المُستقبل بنوع المائع المختار، فمثلا لمحطة 380 MW (1.3×10^9 Btu/h) لها ارتفاع برج يتراوح بين 140 m – 170 m وحقل محاط بمرايا الهليوستات يكون:

- وزن المُستقبل الخارجى الذى يستخدم الصوديوم كمائع 250000 kg
- أو، وزن المُستقبل المجوف الهواء 2500000 kg

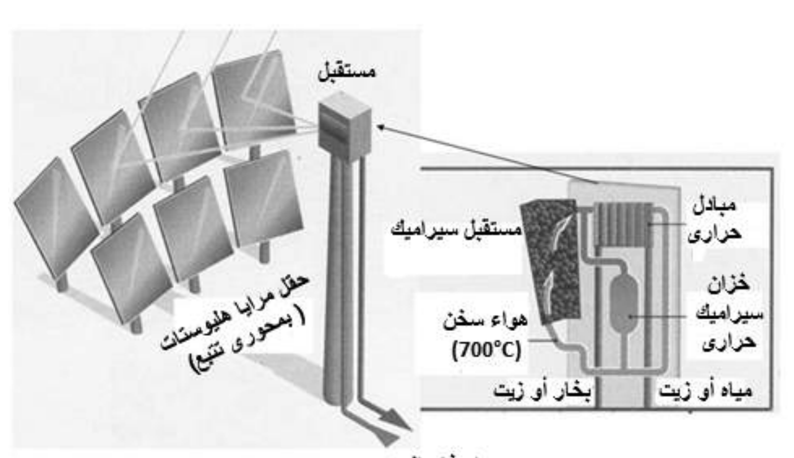
يشير تحليل التكاليف إلى أن أبراج الهيكل الصلب تكون أقل تكلفة عن الأبراج الخرسانية للارتفاعات أقل من 120 m بينما تكون تكلفة الأبراج الخرسانية أقل من الأبراج الصلب للارتفاعات الأكبر من 120 m

يوضح شكل (35) العلاقة بين ارتفاع البرج وتكاليف الانشاءات فى حالتى الأبراج الخرسانية والصلب، تكاليف البرج لأطوال مختلفة، مع مراعاة اختلاف المُستقبل واختلاف الوزن. عند التصميم أخذ فى الإعتبار أن يتحمل البرج سـرعة رياح 40 m/s (90 mph)، وسـرعة الارض 0.25g (gravity)

(1981-Battleson)، ويبين شكل (36) مكونات محطة برج الطاقة المركزى (الحقل – المستقبل البرج)



شكل (35) العلاقة بين ارتفاع البرج وتكاليف الإنشاءات فى حالتى الأبراج الخرسانية والصلب



شكل (36) مكونات محطة برج الطاقة المركزى (الحقل – المُستقبل البرج)

النسبة r / h

عند تصميم محطات قوى البرج المركزي يجب أن يؤخذ فى الإعتبار النسبة r / h حيث:

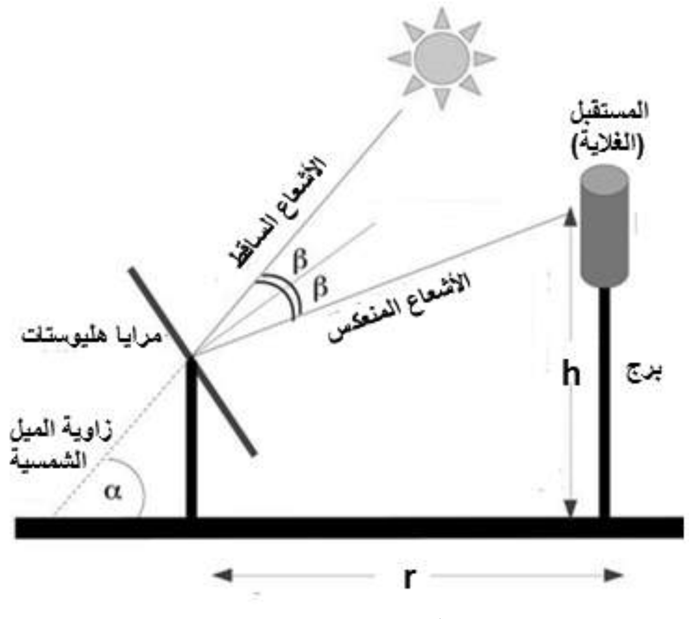
h = ارتفاع البرج

r = المسافة بين أبعد هليوستات عن البرج الشمسى

لأغلب محطات قوى البرج المركزى تتراوح النسبة r / h بين 5.7 & 6.8، كلما زادت هذه النسبة كلما زاد تأثيرالمنع (blockage effect) , وكلما زادت قيمة r (أكبر من 1km) كلما زادت مفقودات التوهين (attenuation losses)

يوضح شكل (36) تعريف r &h، أى:

- المسافة بين البرج والهليوستات والتى تختلف من هليوستات إلى آخر
- الارتفاع وهو الوضع الأفقى لمكان المُستقبل (الغلاية والتى تسخن بواسطة الهليوستات)



شكل (36) تعريف r&h

مميزات محطات برج الطاقة المركزي:

- تجمع الطاقة الحرارية البصرية وتحولها إلي مُستقبل أحادي، وبأقل طاقة حرارية منقولة مطلوبة
- تصل نسبة التركيز بين 300 الي 1500 ضعف، وبكفاءة عالية لكل من الطاقة المجمعة والطاقة المحولة إلي كهرباء.
- تخزين الطاقة الحرارية عند درجات حرارة عالية
- يمكن التركيب علي أراضي مائلة نسبيا (ذات ميل 5% فأكثر) وبذلك تنخفض التكاليف اللازمة لتجهيز الأرض قبل بداية المشروع.
- تصل إلي قدرات عالية (أكثر من 10MW) وبالتالي تكلفة اقتصادية للمقاسات الكبيرة.
- إمكانية الهجين (hybrid) مع أنظمة أخري
- المناسب الأفضل للتبريد الجاف
- لا يصدر عنها غازات أو انبعاثات مائية اثناء التشغيل
- إذا حدث تسريب أو إنسكب الملح، فإنه يتجمد قبل حدوث أية مكونات ترابية
- إذا إنسكب الملح فإنه يمكن جرفه وإعادة تدويره عند الحاجة

عيوب محطات برج الطاقة المركزي:

- تحتاج تكاليف التشغيل والاستثمارات وقيمة الأداء السنوي التطبيق علي مدي واسع تجاريا
- عدم القدرة علي توفير الطاقة في ظروف انتشار الضوء، حيث ينخفض ناتج الطاقة بشكل كبير في الظروف الغائمة
- تحتاج لنظام تتبع للشمس للحفاظ علي تركيز أشعة الشمس علي الهليوستات (المجمع)
- أكثر حساسية لمشاكل التلوث

خصائص بعض محطات قوى البرج المركزي بالعالم

يوضح جدول (5) خصائص بعض محطات قوى البرج المركزي (Source : NREL)

يبين جدول (6) البيانات الأساسية لبعض خصائص محطات قوى البرج المركزي القائمة (Source:www.cstep.in)

ويوضح جدول (7) بيانات إرتفاع البرج لبعض خصائص محطات قوى البرج المركزي القائمة

نلاحظ بجدول (7) أن:

- بالمحطة ISEGS فإن $r / h = 10.4$
- بالمحطتين Julich solar Tower&Sierra sun Tower فإن $r / h = 2.3$

من المعروف أن $r = 1400$ m للمحطة ISEGS ولذا فإن النسبة r / h بها أكبر من 10، وعليه فمن الأفضل تقيد النسبة r / h بحيث تكون أقل من 7، ويتحقق ذلك بتصميم r أقل من 1km

يوضح جدول (8) خصائص المستقبل ومجموعة القوى لبعض محطات قوى البرج المركزي القائمة

بالإضافة إلى أن جدول (9) يبين ساعات التخزين ومساحات المرايا والأرض لبعض محطات قوى البرج المركزي.

جدول (5) خصائص بعض محطات قوى البرج المركزي(Source : NREL)

المتغيرات	S2	S3 (USA)	S50	S100	S200
سنة التشغيل	1996	2004	2006	2008	2014
دورة القوى	رانكين	رانكين	رانكين	رانكين	رانكين
إجمالي القدرة (MW_e)	10	13.65	50	100	200
عامل السعة (%)	21	76	75	73	74
مقاس الهليوستات (m^2)	39/95	95	95	148	148
تصميم الهليوستات	زجاج/معدن	زجاج/معدن	زجاج/معدن	زجاج/معدن	زجاج/معدن
مقاس الحقل الشمسي (km^2)	0.08	0.23	0.72	1.32	2.61
مساحة المُستقبل m^2	100	280	710	1110	1930
أقصى فيض ساقط على المُستقبل MW/m^2	0.8	0.95	1.2	1.4	1.6
النسبة بين متوسط/ أقصى فيض ساقط	0.6	0.51	0.5	0.5	0.5
متوسط الفيض الساقط على المستقبل (MW/m^2)	0.48	0.49	0.6	0.7	0.8
ساعات التخزين الحراري	3	16	16	13	13
مساحة الأرض km^2	0.4	1.1	3.4	6.6	13.8

جدول (6) البيانات الاساسية لبعض خصائص محطات قوى البرج المركزي القائمة (Source:www.cstep.in)

اسم المحطة	البلد	السعه MWe	عدد الهليوستات	مساحه فتحه الهليوستات (m^2)	ارتفاع البرج (m)
PS-10	اسبانيا	11	624	120	115
PS-20	اسبانيا	20	1255	120	165
ACME	الهند	2.5	14280	1.14	46
Dahan	الصين	1.5	100	100	118
Solugas	اسبانيا	4.6	69	121	75
Gemasolar	اسبانيا	19.9	2650	120	140
ISEGS	امريكا	392	173500	14.08	140
Sierra sun Tower	امريكا	5	24360	1.14	55
Julich solar Tower	المانيا	1.5	2153	8	60

جدول (7) بيانات إرتفاع البرج لبعض خصائص محطات قوى البرج المركزي القائمة (Source:www.cstep.in)

r / h	ارتفاع البرج m	مقنن السعة MWe	إسم المحطة
6.5	115	11.02	PS-10
5.6	165	20	PS-20
	46	2.5	ACME
	118	1.5	Dahan
6.2	140	20	Gemasolar
10.4	140	392	ISEGS
2.3	55	5	Sierra sun Tower
2.3	60	1.5	Julich solar Tower

جدول (8) خصائص المستقبل ومجموعة القوى لبعض محطات قوى البرج المركزي القائمة(Source:www.cstep.in)

اسم المحطة	المستقبل					مجموعه القوي		
	النوع	مائع انتقال الحرارة	درجة حرارة المدخل °C	درجة حرارة المخرج °C	الضغط (bar)	درجة الحرارة °C	التبريد
PS-10	مجوف	مياه	50	250-300	45	250-300	رطب
PS-26	مجوف	مياه	50	250-300	45	250-300	رطب
ACME	مجوف	مياه	218	400	60		رطب
Dahan	مجوف	مياه	104	400			رطب
Solugas	مجوف	هواء		850	10	850	
Gemasolar	اسطوانه خارجية	ملح منصهر	290	656			رطب
ISEGS	مستطيل خارجي	مياه	249	566			جاف
Sierra sun Tower	تجويف ثنائي خارجي	مياه	218	440	60	440	رطب
Julich solar Tower	حجمي	هواء	120	680	26	485	رطب-جاف

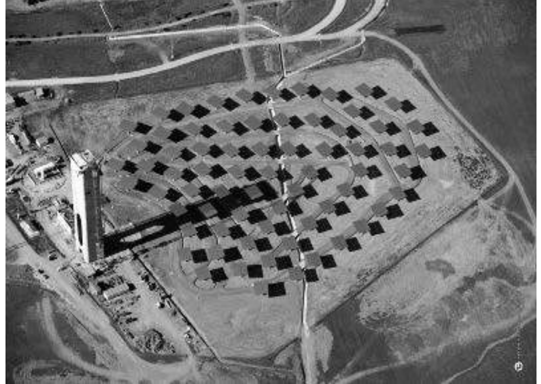
جدول (9) ساعات التخزين ومساحات المرايا والأرض لبعض محطات قوى البرج المركزي (Source: www.cstep.in)

إسم المحطة	مقنن السعة MWe	ساعات التخزين	السعة المكافئة MWe	مساحة المرايا m^2	مساحة الأرض ha	مساحة المرايا / السعة المكافئة m^2/MWe	مساحة الأرض / السعة المكافئة m^2/MWe	نسبة مساحة الأرض إلي مساحة المرايا
PS-10	11.02	1	12.2	7.5E4	55	6125	44918	7.4
PS-20	20	1	22.22	1.5E5	80	6750	36000	5.3
ACME	2.5	0	2.5	1.6E4	4.85	6489	19425	3
Dahan	1.5	1	1.67	1E4	5.2	6000	31200	5.2
Solugas	4.6	0	4.6	8.3E3	6	1815	13043	7.2
Gemasolar	20	15	53.3	3.9E5	195	5992	36746	6.1
ISEGS	392	0	392	2.6E6	1.417	5857	36148	6.1
Sierra sun Tower	5	0	5	2.8E4	8.1	5534	16200	2.9
Julich solar Tower	1.5	1.5	1.75	1.8E4	8	10285.7	45715	4.4

ويوضح شكل (37) محطتى PS-10 & PS- 20 بأسبانيا، حيث يوجد برجين –ويحيط PS10 بعدد 624 هليوستات – وهي المرايا الضخمة التي تتبع الشمس طوال العام، والتي تعكس أشعة الشمس إلى أعلى البرج حيث يقع جهاز استقبال الطاقة الشمسية والتوربينات البخارية. ويحيط المحطة PS20 بعدد 1255 هليوستات. يقع المشروع على بعد 20 كم غرب إشبيلية ويستقبل الشمس يوميا بمعدل 9 ساعات باليوم تعتبر التكلفة أعلى من الطريقة التقليدية ولكنها أقل ضرر بالبيئة. ويوضح شكل (38) محطة Solugas، ويبين شكل (39) محطةACME، كما يوضح شكل (40) محطة Dahan، أما الشكل (41) فيوضح محطة Solar two كاليفورنيا



شكل (37) محطتى PS-10 & PS- 20 بأسبانيا



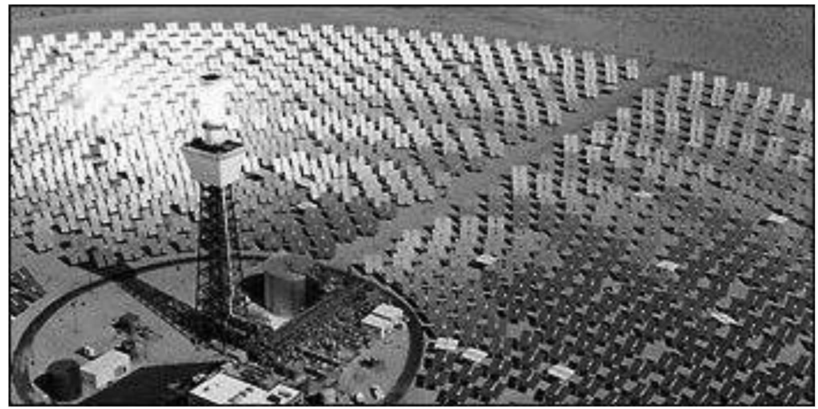
شكل (38) محطةSolugas



شكل(39) محطةACME



شكل (40) محطة Dahan



شكل (41) محطة Solar two - كاليفورنيا

الباب التاسع
محطات قوى مجمعات حوض قطع مكافئ
Parabolic Trough Collectors Power Plants
(PTC Power Plants)

تكنولوجيا مجمعات حوض قطع مكافئ الشمسية هى الأكثر التي أثبتت جدواها فى تكنولوجيا المجمعات الحرارية. ويرجع ذلك في المقام الأول إلى تشغيل تسعة محطات في صحراء موهافي بكاليفورنيا منذ منتصف الثمانينيات. في هذه المحطات،توجد حقول كبيرة جدا من مجمعات انتاج الطاقة الحرارية المستخدمة لإنتاج البخار الموردة لدورة رانكين توربين/ مولد Rankine steam) turbine-generator cycle)لإنتاج الطاقة الكهربائية. كل مجمع يحتوى على عاكس قطع مكافئ خطي، الذي يركز شعاع الشمس المباشرعلى مستقبل خطي يقع في محور القطع المكافئ. يوضح شكل (1) الشكل النموذجى لمحطات مركزات شمسية لأنتاج الطاقة الحرارية ويبين جدول (1) خصائص محطات انتاج الطاقة الحرارية بجنوب كاليفورنيا.
(Solar Energy Generating System) SEGS



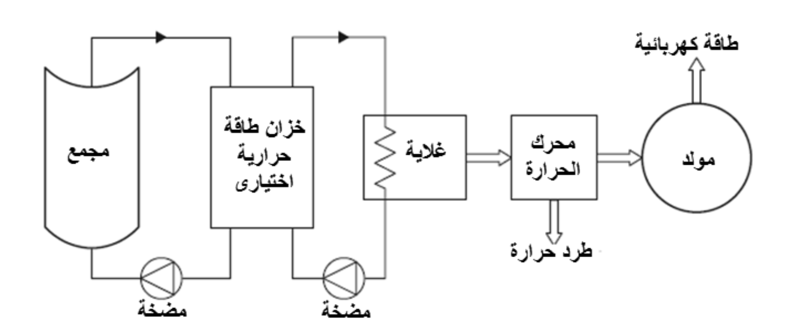
شكل (1) الشكل النموذجى لمحطات أنتاج الطاقة الحرارية

جدول (1) خصائص محطات SEGS بجنوب كاليفورنيا

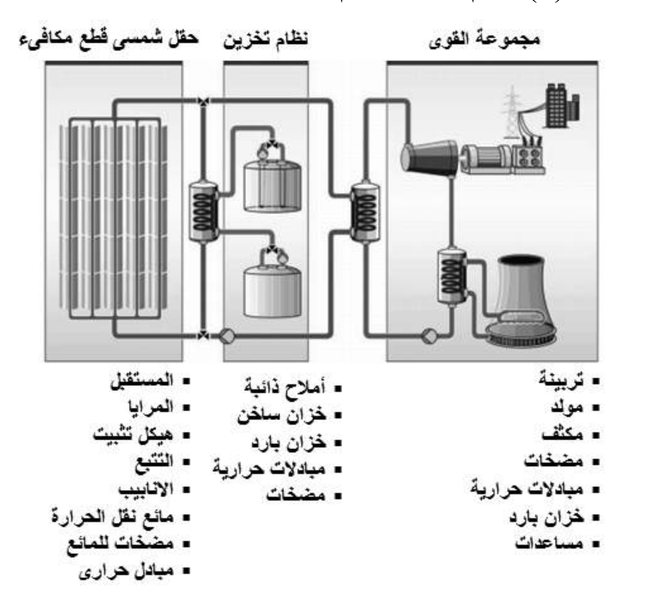
المحطة	بداية سنة التشغيل	المخرج النهائي Net) (output (MWe)	درجة حرارة مخرج الحقل solar) outlet temp) (°C)	المجمع المستخدم Luz) (collector	مساحة الحقل الشمسي solar) field area) (m²)	كفاءة التربينة الحرارية solar) turbine eff) (%)	كفاءة تربينة الوقود Fossil) turbine eff) (%)	المخرج السنوي annual) (output (MWha)
I	1985	13.8	307	LS-2	82960	31.5	-	30100
II	1986	30	316	LS-2	190338	29.4	37.3	80500
III	1987	30	349	LS-2	230300	30.6	37.4	92780
IV	1987	30	349	LS-2	230300	30.6	37.4	92780
V	1988	30	349	LS-2	250500	30.6	37.4	91820
VI	1989	30	390	LS-2	188000	37.5	395	90850
VII	1989	30	390	LS-2 & LS-3	194280	37.5	39.5	92646
VIII	1990	80	390	LS-2	464340	37.6	37.6	252750
IX	1991	80	390	LS-3	483960	37.6	37.6	256125

يوضح شكل (2) نظام الطاقة الحرارية الشمسية وفيه تجمع الأشعة الشمسية بواسطة مجمعات المركزات الشمسية، والمستخدمة لتشغيل محرك حرارى (heat engine) (في الديناميكا الحرارية، المحرك الحرارى هو نظام يحول الحرارة أو الطاقة الحرارية والطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية، والتي يمكن بعد ذلك أن تستخدم للقيام بشغل ميكانيكي. ويتم ذلك من خلال جلب مادة الشغل من حالة درجة الحرارة العليا إلى حالة درجة الحرارة الأقل).
بعض هذه الأنظمة تحتوى على خزان حرارى والذى يسمح بتشغيل المحرك خلال الأجواء الضبابية وأوقات الليل، وذلك من خلال اختيار درجات حرارة تشغيل مناسبة، لأن كفاءة المحرك الحرارى تزيد بارتفاع درجة حرارة تشغيلة، بينما تقل كفاءة المجمع الشمسى بارتفاع درجة حرارتة.
وتتميزنظم المركزات الشمسية الحرارية بإمكانية تكاملها مع النظم التقليدية لانتاج الكهرباء بالاضافة إلى أنها تضمن امدادات منتظمة للكهرباء، كما أنها لاتتسبب فى مشاكل لتشغيل الشبكة الكهربائية، لذا فإنها تتكون من ثلاثة قطاعات

رئيسية هى: الحقل الشمسى، نظام تخزين، مجموعة القوى، ويوضح شكل (3) مكونات كل قطاع



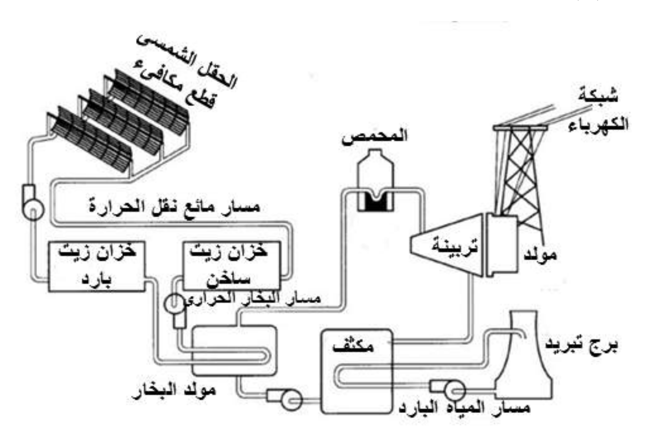
شكل (2) رسم خطى لنظام تحويل الطاقة الحرارية الشمسية



شكل (3) مكونات محطات مركزات قطع مكافىء شمسية لانتاج الطاقة الكهربائية

يتكون حقل المجمع من عدد كبير من مجمعات القطع المكافىء التى تتعقب الشمس من خلال محاور أحادية، مركبة فى صفوف متوازية متجهه أفقيا

نحوالشمال / الجنوب وتتبع الشمس من الشرق إلى الغرب، للتأكد أن الشمس تتركز بصفة مستمرة على المستقبِل الخطى. حيث يدور مائع نقل الحرارة خلال المستقبل والذى يسخن عن طريق الطاقة الشمسية ثم يمر فى المبادلات الحرارية ويكمل الدائرة حتى الحصول على الكهرباء من خلال مجموعة القوى كما فى شكل (4).



شكل (4) مكونات محطة انتاج الكهرباء باستخدام مركزات شمسية قطع مكافىء

مكونات حقل شمسى قطع مكافىء

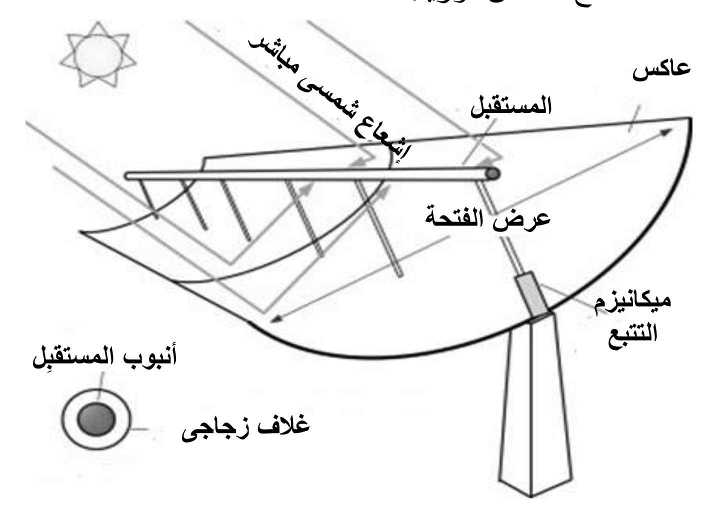
مجمع حوض قطع مكافئ (Parabolic Trough Collector) (PTC)

المجمع (collector) هو جهاز يستخدم لتحويل الطاقة الموجودة في أشعه الشمس أو الإشعاع الشمسي إلى صوره قابلة للإستخدام والتخزين(طاقة حرارية). يوضح شكل (5) مكونات مجمع حوض القطع المكافىء.

يتصف مجمع القطع المكافئ بـ :

- أن الأشعة الواردة والتي تكون موازية لمحور القطع المكافئ سيتم عكسها تجاه البؤرة بغض النظر عن مكان وصولها على القطع المكافئ.
- أن أشعة الضوء الشمسي والتي تصل إلى الأرض تكاد تكون متوازية، لذا إذا كان القطع المكافئ محاذياً مع محوره مشيراً إلى الشمس، فسيتم انعكاس كل من الأشعة الواردة (تقريباً) تجاه نقطة البؤرة للقطع المكافئ

▪ منعا لتشتت الأشعة المنعكسة بعيداً عن محور البؤرة أو لتفادي التقليل من كمية الأشعة المنعكسة بسبب التلوث (مثل الرمال والأتربة) يجب نظافة السطح العاكس دوريا.



شكل (5) مكونات مجمع حوض القطع المكافىء

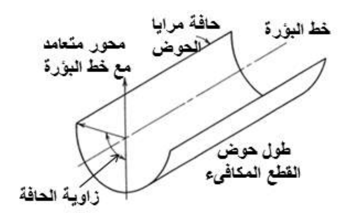
يوصف مجمع حوض القطع المكافىء بالمتغيرات الآتية:

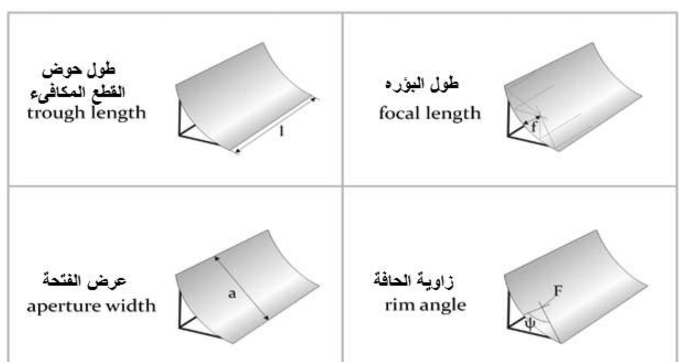
- طول حوض القطع المكافىء
- زاوية الحافة
- مساحة الفتحة
- طول (عرض) الفتحة
- مسافة البؤرة
- زاوية السقوط

يوضح شكل (6) تعريف متغيرات حوض قطع مكافىء

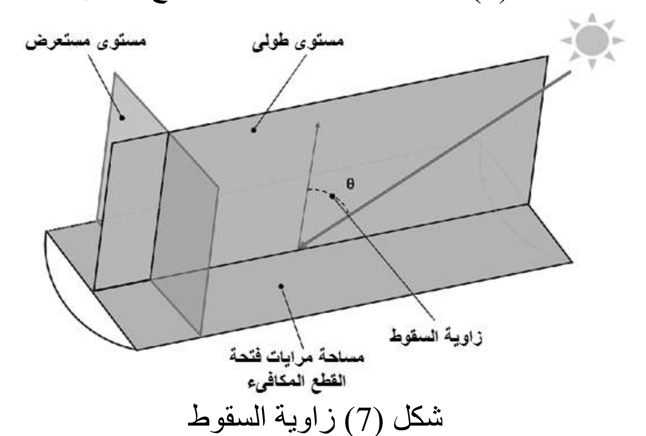
زاوية السقوط (θ) (incidence angle)

هى الزاوية بين شعاع مباشر من الشمس ومستوى فتحة مجمع حوض القطع المكافئ، والموضحة فى شكل (7)





شكل (6) تعريف متغيرات حوض قطع مكافىء



شكل (7) زاوية السقوط

تعتمد قيمة زاوية السقوط على:

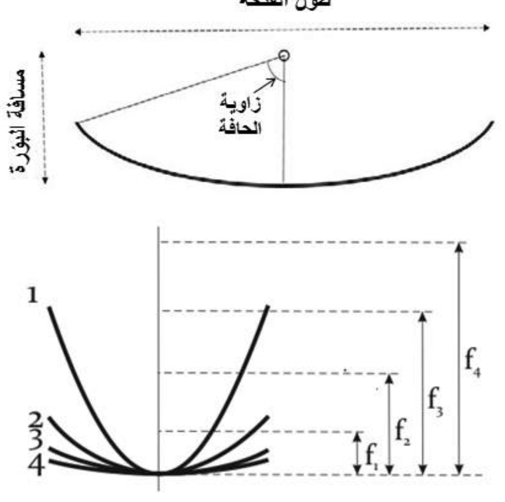
- موقع المحطة (خطى العرض والطول)

- اليوم فى السنة
- الوقت فى اليوم
- اتجاة التتبع

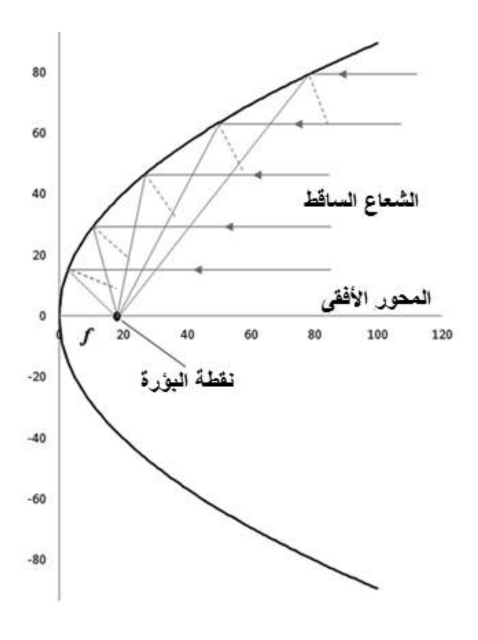
زاوية الحافة (Ψ) (rim angle)
لمجمع حوض القطع المكافىء المسطح :

- لزاوية حافة أصغر - مسافة بؤرة أطول (focal length).
- عادة تكون حدود زاوية الحافة بين ° 115 & ° 70
- تحتاج زاوية الحافة الأكبر إلى أسطح عاكسة أكبر لنفس مساحة الفتحة وبالتالى ارتفاع تكاليف المجمع وزيادة وزنه.
- تعتبر نسبة التركيز من أهم العوامل المؤثرة عند اختيار زاوية الحافة.
- تحتاج نسبة التركيز الأعلى إلى زاوية حافة أكبر من القيم الشائعة لزاوية الحافة ° 72.5

يوضح شكل (8) العلاقة بين مسافة البؤرة ودرجة انحناء القطع المكافىء، عموما فى عاكس مجمع القطع مكافئ، تنعكس جميع الأشعة الموازية لمحور القطع المكافئ من خلال نقطة البؤرة (المحورية) (focal point) كما فى شكل (9).



شكل (8) العلاقة بين مسافة البؤرة ودرجة إنحناء القطع المكافىء



شكل (9) تنعكس جميع الأشعة الموازية لمحور
القطع المكافئ من خلال نقطة البؤرة

نسبة التركيز الهندسى (CRg) (geometric concentration ratio)

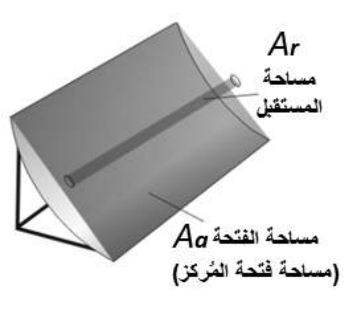
هى النسبة بين مساحة المُركِز (مساحة فتحة الحوض) إلى مساحة المستقبِل، كما فى المعادلة التالية :

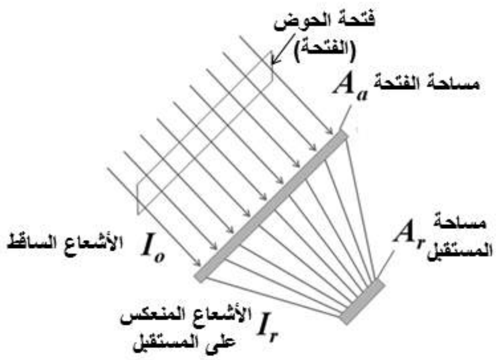
$$CRg = Aa / Ar$$

أى أن:

نسبة التركيز= (مساحة فتحة الحوض) / (مساحة المُستقبِل)

يوضح شكل (10) تعريف لمساحة فتحة الحوض ومساحة المُستقبِل كذلك تمثيل لعملية تركيز الأشعة الضوئية.





شكل (10) تمثيل لعملية تركيز الأشعة الضوئية

وحدة نسبة التركيز (Solar concentration, concentration ratio)

وحدة نسبة التركيز تكون :suns أو times أو folds والتى جميعها تعنى " تكرار أو عدد مرات " أو تكون النسبة بدون أى وحدة

- Measured in “suns” (the square of the magnification)
  e.g.:100-200 **suns**
- Or in times
e.g.: 500-1000 **times**
- Or in folds
e.g.: 100-200 **folds**
- Without unit
e.g.: 60-80

هيكل التثبيت (Supporting structure)

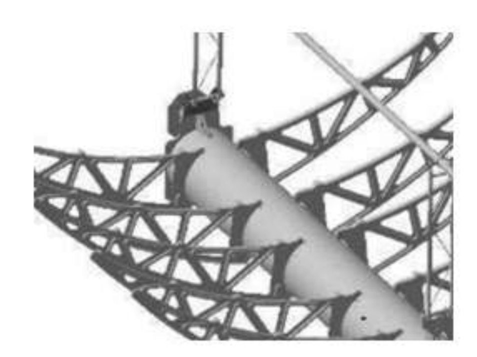
عبارة عن هيكل المجمع وتكون وظائفه:

- تثبيت المرايات العاكسة وأنبوب الامتصاص.
- مراعاة تحمل الاجهادات الخارجية (مثلا تأثير الرياح).
- السماح بدوران المجمع لتتبع الشمس بصفة مستمرة.

يوجد العديد من التكنولوجيات التجارية لهياكل المجمع والتي تختلف في الطول وفتحة المجمع والمادة المستخدمة لتثبيت الحزم.

يوضح شكل (11) هيكل التثبيت المجمع





شكل (11) هيكل التثبيت المجمع

المرايات العاكسة (Reflecting mirror)

عبارة عن مرايا طولية مقعرة فى شكل قطع مكافىء والتي تقوم بتركيز أكبر كمية متاحة من الاشعاع الشمسي علي أنبوبة الامتصاص. أثناء النهار تتبع المرايا صعود الشمس وهبوطها للحصول على أحسن انعكاس، وأكثر العوامل المؤثرة على عمل المحطة هو الرياح.

وتمتاز المرايا بالاتي:

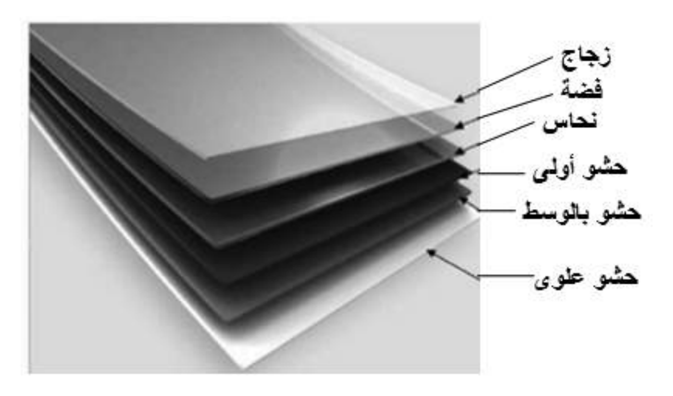
- انعكاسية عالية (% 96 / 90)
- خفيفة الوزن (سهولة التداول)
- كفاءة التيبس (القساوة) (stiffness) (أقل تدهور في المرايات عند التعرض لأحمال ديناميكية)
- المتانة
- أخطاء طيفي منخفض

الصلابة (Stiffness)(صلابة الغرض) - إلى أي مدى يقاوم التشوه استجابة للقوة المطبقة. والمفهوم التكميلي هو المرونة، كلما كان الغرض أكثر مرونة، كلما قلت قوته).

يوضح شكل (12) مرآة نصف اسطوانية مقعرة في حقل لوكهارد بالقرب من بحيرة هاربر، كاليفورنيا. ويوضح شكل (13) مكونات مرايا المجمع.



شكل (12) الصورة فى الجانب الأيسر عبارة عن مرآة نصف اسطوانية مقعرة في حقل لوكهاردبالقرب من بحيرة هاربر، كاليفورنيا



شكل (13) مكونات مرايا المجمع

أنبوب الامتصاص (Absorber tube)

يكون موضعها في بؤرة القطع المكافئ كما فى شكلى (14)،(15) والتى تعمل علي تحويل الطاقة المصطادة (المنعكسة) إلي مائع نقل الحرارة (عمل المائع المار بداخل الأنبوب) يوضح شكل (16) أنبوب الامتصاص لمجمع حوض قطع مكافىء،**ويؤخذ فى الاعتبار الآتى:**

- نوع معدن الأنبوب.
- الطلاء المختار.
- ثغرة هواء (air gap) بفراغ عالي والتى تعمل على :
  - الحد من مفقودات الحرارة بالتوصيل
  - حماية الطلاء من الأكسدة
- أنبوب خارجى من الزجاج

مثال لأنبوب الامتصاص : الطول 4 متر بسمك 70 مم

يصمم أنبوب الامتصاص بحيث تكون له أقصي خصائص بصرية (optical)

وللوصول إلي أقصي كفاءة بصرية للمجمع يجب أن يؤخذ فى الاعتبار:

- عامل النقل (transmissivity) لزجاج الأنبوبة %97 / 93 = ح
- الامتصاصية (absorptivity) للدهان المختار $\alpha = 92 / 97\%$

(الامتصاصية هى تغلغل إحدى المواد فى مادة أخرى)

لتقدير المفقودات الحرارية لأنبوب الامتصاص ، تكون المتغيرات الأساسية الهامة هي :

- آلية الفقد الأساسي هو مفقودات الاشعاع
- انبعاثية الطلاء المختار $\epsilon = f(T)$ وذلك لجميع التكنولوجيات والتى تزيد مع درجة الحرارة

(**انبعاثية** مادة ما (ε) (Emissivity))هي القدرة النسبية لسطح المادة على إصدار الطاقة عن طريق الإشعاع وهي نسبة الطاقة المنبعثة من المادة إلى الطاقة

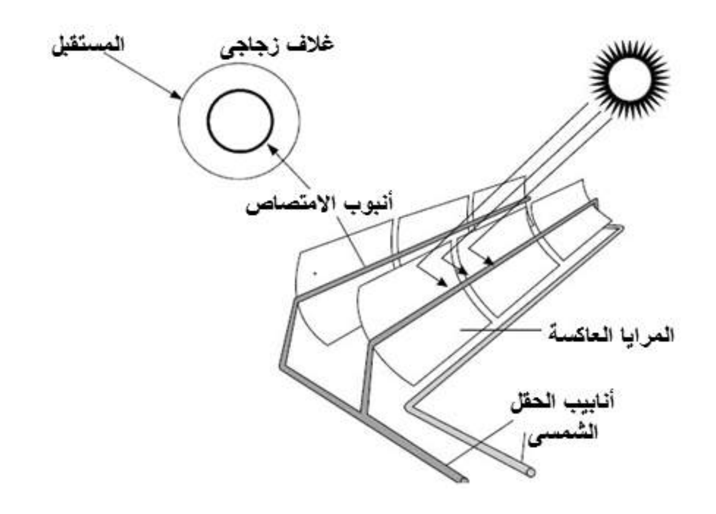
المنبعثة من الجسم الأسود عند درجة الحرارة نفسها. وهي قياس لقدرة المادة على اشعاع الطاقة الممتصة).

(الامتصاص (Absorptance)**هو جزء من الإشعاع يمتص في طول موجة معين).**

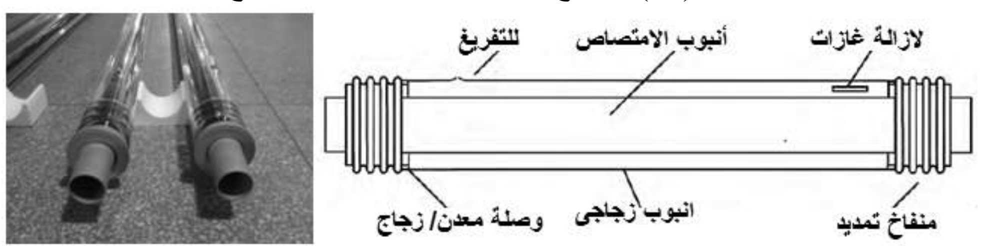
(النفاذية الشمسية (Solar transmittance)هى نسبة الإشعاع الشمسي الحادث عموديا على زجاج وتنتقل من خلالة) .



شكل (14) موضع أنبوب الامتصاص فى المجمع



شكل (15) موضع أنبوب الامتصاص فى المجمع



شكل (16) أنبوب الامتصاص لمجمع حوض قطع مكافىء

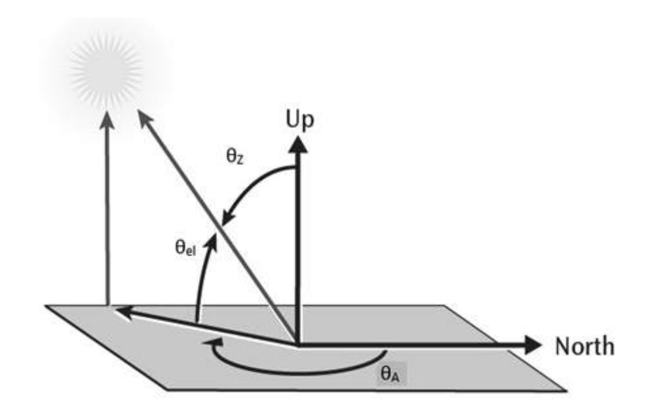
اتجاه الحقل الشمسي (solar field orientation)

لتحديد اتجاة الحقل الشمسى يلزم معرفة زوايا السمت والسمت الأفقى، ويوضح شكل (17) ذلك

S = θz = zenith angle, measured from vertical
= زاوية السمت

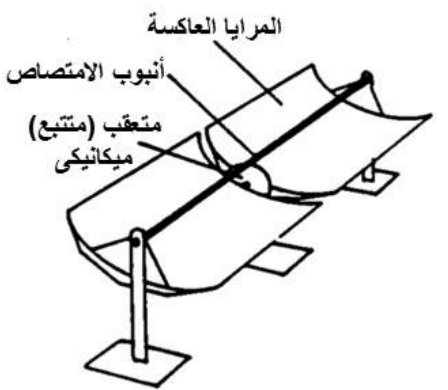
Y = θA = azimuth angle, measured from north
= زاوية السمت الأفقية

Θel = elevation angle, measured up from horizon
= زاوية الارتفاع

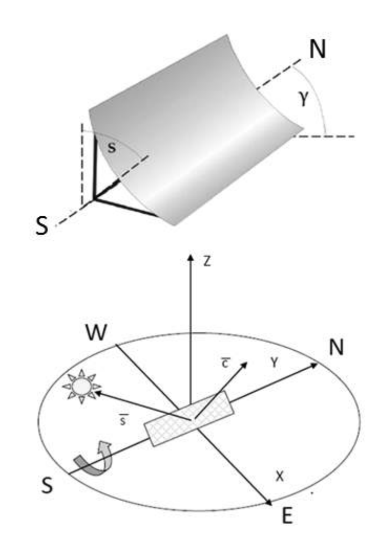


شكل (17) تعرف الزوايا

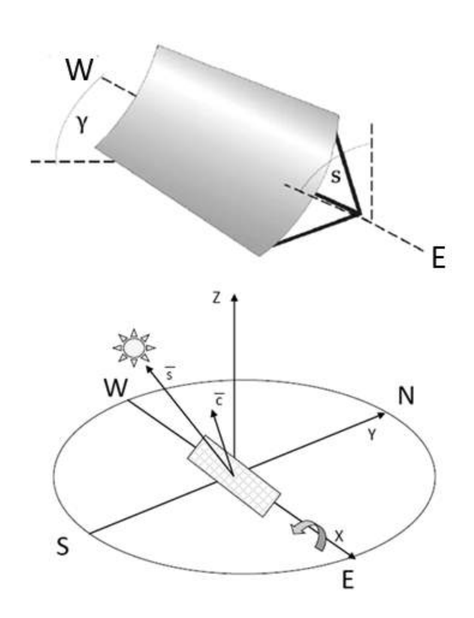
نظريا ، يمكن أن يكون الحقل الشمسي لحوض القطع المكافئ بمحطة CSP له أي اتجاه. وهذا محتمل دائما لأنه يتتبع (يتعقب) الشمس,ويوضح شكل (18) متعقب ميكانيكى بحوض القطع المكافىء. ومع ذلك ، يكون له اتجاه مفضل، حيث يكون ضبط المحور(alignment) شمال - جنوب ، مع الأخذ في الاعتبار أن التتبع(التعقب) يكون في اتجاه شرق – غرب، والموضح بشكل (19) كما يوضح شكل (20) ضبط المحورشرق – غرب، والتتبع (التعقب) في اتجاه شمال - جنوب



شكل (18) متعقب ميكانيكى بحوض القطع المكافىء



شكل (19) ضبط المحور شمال جنوب، والتتبع (التعقب) في اتجاه شرق غرب



شكل (20) ضبط المحورشرق - غرب، والتتبع (التعقب) في اتجاه شمال - جنوب

انتاج الطاقة الحرارية

- خلال السنة تختلف الطاقة الحرارية المنتجة إلى حد كبير من حقل شمسي قطع مكافىء تتجه محاوره بين الشمال والجنوب. حيث تكون الطاقة المنتجة أكثر من ثلاثة إلى أربعة أضعاف الطاقة المنتجة يوميا خلال أشهر الصيف مما كانت عليه في أشهر الشتاء. الطاقة الحرارية المنتجة من حقل شمسى تتجه محاورة من الشرق والغرب لا تختلف كثيرا من فصل الصيف إلى فصل الشتاء
- إن الإنتاج السنوى للطاقة الحرارية المنتجة من حقل شمسي تتجة محاورة من الشمال إلى الجنوب أكبر من ناتج حقل شمسى تتجة محاورة بين الشرق والغرب
- يعتمد حجم الحقل الشمسي على الطاقة الكهربائية الأسمية لمجموعة القوى و أيضا على وجود أو عدم وجود نظام لتخزين الطاقة الحرارية وعلى قدرتها

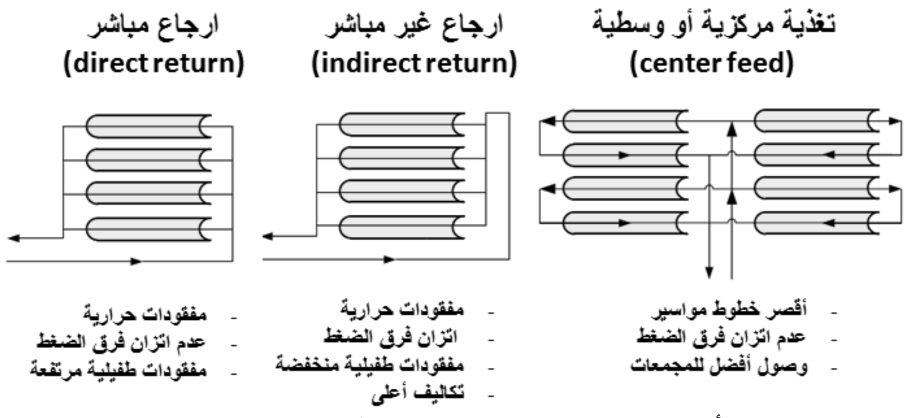
طرق ترتيب مجمعات حوض القطع المكافئ بالحقل الشمسي
(Layouts for PTC Solar fields)

لأنظمة حوض القطع المكافئ الكبيرة تجاريا و التي لها أكثر من 80 Km مجمعات، توزع المجمعات في عدد كبير من الصفوف المتوازية. من الضروري الإهتمام بطرق توصيل و ترتيب المصفوفات و مواسير الحقل الشمسي، و ذلك للحفاظ على الانخفاض النسبي لكل من مفقودات الضغط و مفقودات استهلاك الكهرباء الطفيلي (parasitic electricity consumption) و هو فقد غير مرغوب فيه و يؤدي إلى فقد الطاقة أو حدوث مشاكل في قيم المتغيرات الكهربائية والذى ينتج أيضا من الأجزاء المتحركة في الحوض نفسه.

يوجد ثلاث طرق رئيسية للترتيب، والموضحة بشكل (21)،هي:

- ارجاع مباشر (direct return).
- ارجاع عكس (reverse return)(أو ارجاع غير مباشر indirect return)
- تغذية مركزية أو وسطية (center feed).

في جميع هذه الطرق نجد أن مواسير المخرج الساخنة تكون أقل طولا من مواسير المدخل البارد و ذلك للوصول لأدنى مفقودات حرارية.



شكل (21) أنواع ترتيب مجمعات حوض القطع المكافئ بالحقل الشمسي

يكون ترتيب مواسير طريقة "الإرجاع المباشر" هو الأبسط و الأكثر إنتشارا في الحقول الشمسية الصغيرة. ومن العيوب الرئيسية في هذه الطريقة وجود إختلاف كبير في الضغط بين مداخل الصفوف المتوازية. لذلك يضاف بلوف (valves) يدوية فيها و ذلك للحفاظ على ثبات السريان في كل صف. تسبب هذه البلوف هبوط إضافي في ضغط الحقل الشمسي، و يظهر تأثيره في الفقد الكلي لضغط النظام.

النتيجة النهائية مفقودات طاقة طفيلية اعلى من طريقة ترتيب " الإرجاع العكسي" حيث يدخل المائع مصفوفة المجمعات عند النهاية العكسية (المقابلة)، و يكون للصفوف ذات أنابيب المدخل الأطول، أنابيب مخرج أقصر، أي لإتزان أفضل لهبوط الضغط مشارك في كل صف. و لذا، يكون الطول الكلي للمواسير في طريقة " الإرجاع العكسي" أطول من طريقة "الإرجاع المباشر" أي مفقودات حرارية أعلى، على الرغم من أن هذا يعتمد بشدة على درجة حرارة مدخل الحقل الشمسي.

إذا كانت درجة الحرارة منخفضة، عندئذ تهمل المفقودات الحرارية الإضافية. إضافة أطوال للمواسير تعني تكاليف أكثر لإستخدام مواد عازلة أكثر و مهمات

للمائع أكثر.
في طريقة ترتيب أنابيب "الإرجاع العكسي" ، يجب التأكد من السريان المنتظم الكامل الموزع بين كل صفوف التوازي بدون إستخدام بلوف، و لضمان ثبات سرعة المائع يكون إرتفاع أنابيب الممرات الصاعدة (header pipes) أقل من المقاس عند المدخل، و أكبر من المقاس عند المخرج.

يعتبر ترتيب "التغذية المركزية" هو الترتيب الأكثر شيوعا في الحقول الشمسية الكبيرة. و يشبه تصميم "الإرجاع المباشر" من حيث أن فقد الضغط في الحقل الشمسي يكون أعلى إذا وضعت بلوف الإتزان عند مدخل الصف. وفي هذه الطريقة تستخدم أقل مواسير لعدم وجود أنابيب بطول صف المجمعات. بالإضافة إلى إمكانية إقتراب الأنابيب المباشر لصفوف كل مجمع بدون الإحتياج لتركيب مواسير تحت الأرض. وتعتبر هذه هي الميزة الأهم لترتيب "التغذية المركزية" لأن الإقتراب من الحقل الشمسي يكون ضروريا لغسل المجمعات.

و بما أن البلوف اليدوية تركب عند مداخل و مخارج كل صف بغرض الصيانة، فإنه يمكن إستخدامها لإتزان هبوط الضغط في الصفوف المتوازية مع عدم وجود تكاليف إضافية. لكل ما سبق يكون نظام ترتيب "التغذية المركزية" هو الإختيار المفضل للحقول الشمسية بمحطات حوض القطع المكافىء الكبيرة (PTC) (Parabolic Trough Collectors)

ويجب أيضا مراعاة أن تكون تركيبات المواسير جيدة، لأن الكفاءة الكلية تنخفض في حالة عدم كفاية العزل الحراري. إن طول المواسير يسبب زيادة المفقودات الحرارية و بالتالي يخفض كمية الطاقة الحرارية المفيدة و اللازمة لمجموعة القوى (PB). و يجب تخفيف القناطر الحرارية (thermal bridges) المستخدمة لتثبيت الأنابيب والمكونات الأخرى (مثل خزانات الزيت، الطلمبات،...) لنفس السبب.

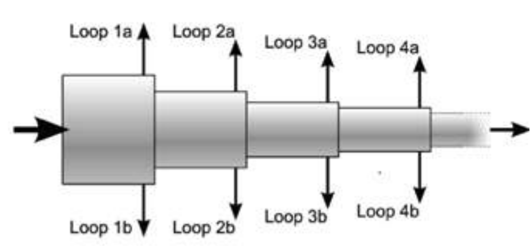
من التركيبات الهامة في الحقل الشمسي لنظام PTC إستخدام بلوف صرف (drain) و بلوف تهوية (venting). تقوم بلوف التهوية بضمان عدم وجود فقاعات هوائية متبقية داخل المواسير بعد ملئها بمائع الزيت الحراري للتشغيل، بينما يستخدم بلوف الصرف لأعمال الصيانة لجزء من المواسير لتفريغها من

المائع و عمل الإصلاحات اللازمة.
و لأن الزيت الحراري يشتعل عند درجات الحرارة العالية، يجب عدم الإصلاح أو عمل لحامات لأجزاء المواسير إلا بعد الصرف الكامل مع ملئها بغاز خالي من الأكسجين.

خصائص المواسير (Piping Characteristics)

- تتغير أقطار مواسير التوصيل بعد كل حلقة (loop) (نظريا), كما بشكل (22)
  أفضل مقاس للمواسير يتم بمقارنة التكاليف الإستثمارية (المواد) و تكاليف التشغيل (قدرة الضخ pumping power).
- يحتاج لإضافة عدة أمتار زيادة للمواسير لتعويض التمدد الحراري للسماح بالدخول لكل حلقة (loop).
- يتم ضبط قطر الممرات الصاعدة للحفاظ على أفضل سرعات سريان ويكون القطر الأصغر للصفوف الفرعية بالحقل الشمسى.





شكل (22) أقطار مواسير التوصيل بعد كل حلقة

مكونات مركزات حوض القطع المكافىء

عادة يتكون شكل القطع المكافئ من أربعة وجهات مرايا ،عبارة عن شرائح زجاج (تخانة 4mm) منحنية حراريا،مكسية بطبقة من معدن الفضة العاكس مضافا إليه طبقات حماية من خلف معدن الفضة.
يكون المكون الأساسي بالمجمع هو الموديول (collector module) وغالبا يجمع 12 موديول لتكوين مصفوفة مجمع شمسى واحد والذى يعرف بـ :(SCA)

- Solar Collector Assembly
- Solar Collector Array

يوضح شكل (23) موديول ومصفوفة مجمع حوض القطع المكافىء ويوضح شكل (24) مكونات مركزات حوض القطع المكافىء بالحقل الشمسى

من أول الشركات التي أنتجت مجمعات حوض القطع المكافئ :

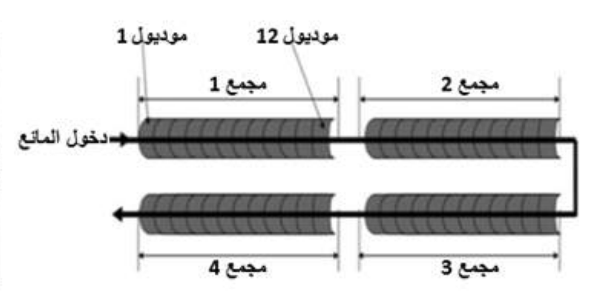
American- Israeli company Luz industries Ltd.

وأخذت المنتجات الأسماء التالية:

- مجمع Euro Trough (ET) مقاس 150m,100m
- مجمعات طرازات : LS-3 & LS-2&LS-1

يبين جدول (2) البيانات الهندسية والبصرية لمجمعات حوض القطع المكافئ





شكل (23) موديول ومصفوفة مجمع حوض القطع المكافىء



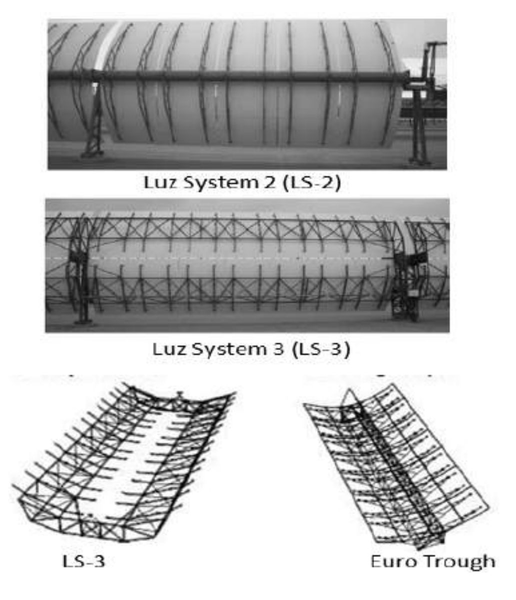
شكل (24) مكونات مركزات حوض القطع المكافىء بالحقل الشمسى

جدول (2) البيانات الهندسية والبصرية لمجمعات حوض القطع المكافئ

طراز المجمع	عرض الفتحة (m)	مسافه البؤرة (m)	طول العنصر (الموديول) (m)	طول المجمع (m)	مساحة المرايا (m^2)	قطر المستقبل (m)	التركيز الهندسي	أقصى كفاءة بصرية (%)
LS-1	2.55	0.94	6.3	50.2	128	0.04	61:1	71
LS-2	5.00	1.49	8.0	49.0	235	0.07	71:1	76
LS-3	5.76	1.71	12.0	99.0	545	0.07	82:1	80
IST	2.30	0.76	6.1	49.0	424	0.04	50:1	78
Euro trough	5.76	1.71	12.0	150.0	817	0.07	82:1	80
Sky trough	6.00	1.71	13.9	115.0	750	0.08	75:1	77

حيث :

- (Aperture width) عرض الفتحة
- (Focal length) مسافة البؤرة
- (Length/element (module)) طول الموديول
- (Receiver diameter) قطر المستقبل
- (Mirror area) مساحه المرايا
- (Geometric concentration) التركيز الهندسي
- (Length/ collector) طول المجمع
- IST: industrial solar technology

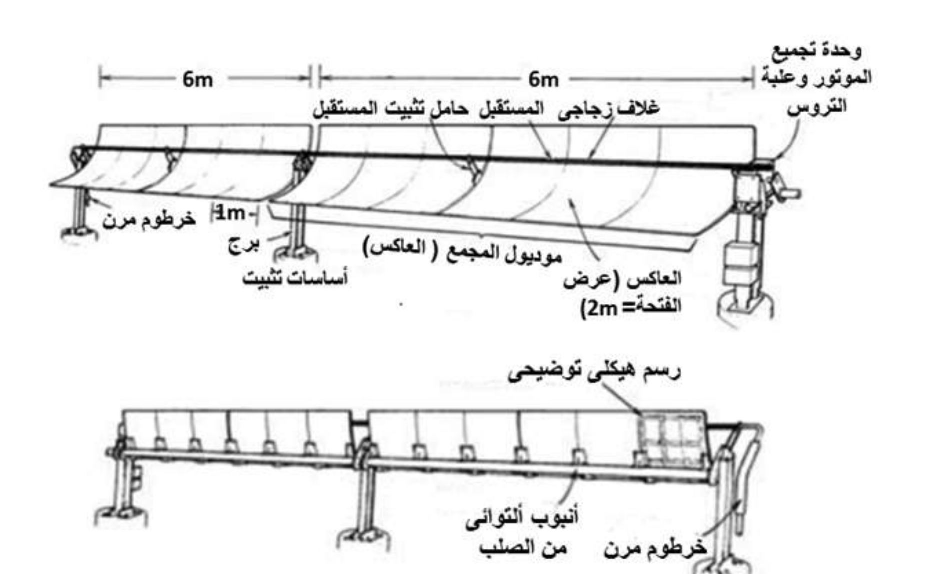


شكل (25) مجمعات طرازات مختلفة

يوضح شكل (25) مجمعات طرازات مختلفة
يوضح شكل (26) مثال لمكونات موديول مصفوفة مجمع شمسى يتكون من مرايات زجاجية مرتبة كالاتى: 4 صفوف كل صف يحتوى على 7 مرايات (كمثال : مقاس المرايا 1.7 m × 1.6 m وسمك 4 – 5 mm)
ويوضح شكل (27) مكونات تفصيلية لمركزات حوض القطع المكافىء



شكل (26) مثال لمكونات موديول مصفوف



شكل (27) مكونات تفصيلية لمركزات حوض القطع المكافىء

تصميم حقل شمسي "حوض قطع مكافئ"

توجد ثلاث مراحل لتصميم حقل شمسي:

المرحلة (1): تعريف نقطة التصميم (design point)،و التي تفرض عندها قيم التصميم.

المرحلة (2): حساب عدد المجمعات المتصلة على التوالي في كل صف متوازي.

المرحلة (3): حساب عدد الصفوف المتصلة على التوازي في الحقل الشمسي.

فيما يلي توضيح ذلك:

يجب على مصمم الحقل الشمسي ألا يأخذ في الإعتبار حالات الطقس المحلية فحسب، بل يؤخذ أيضا في الإعتبار متغيرات تصميم حوض القطع المكافئ للمحطة، بالإضافة لأية مواصفات للعميل لأن الإشعاع الشمسي ليس مصدر طاقة ثابت، لذا فإن المخرج الحراري للحقل الشمسي ليس ثابتا أيضا. هذا يعني

أن الطاقة الحرارية الموردة من الحقل الشمسي أحيانا تكون أقل أو أعلى من قيم التصميم.

عموما ينتج الحقل الشمسي مخرج حراري اسمي (nominal thermal) عندما يكون كل من المتغيرات و حالات التشغيل مماثلة للقيم المفروضة عند نقطة التصميم.

المتغيرات و حالات التشغيل المطلوب تحديدها عند نقطة التصميم هي:

- إتجاه المجمع
- بيانات نقطة التصميم (الشهر – اليوم) و الزمن
- الموقع (خطي الطول و العرض)
- الإشعاع الشمسي المباشر و درجة الحرارة المحيطة للزمن و التاريخ المختار
- طاقة المخرج الحرارية الكلية الصادرة من الحقل الشمسي
- عامل إتساخ (soiling factor) للحقل الشمسي
- درجات حرارة مدخل و مخرج الحقل الشمسي
- نوع المائع
- معدل السريان الإسمي للمائع

كما يجب الأخذ في الإعتبار الأداء الموسمي تبعا للإتجاهات المختلفة، وعلى المصمم إختيار أفضل إتجاه للمحطة الشمسية، إعتمادا على طلب المخرج الحراري و الإحداثيات الجغرافية للموقع. جميع المحطات الحرارية الشمسية التي تحتاج للحصول على أقصى إنتاج طاقة كهربائية سنويا تستخدم حاليا مجمعات متجهة " شمال – جنوب" و بذلك تحصل على أقصى طاقة كهربائية عند ساعات الذروة في أشهر الصيف.

عادة يختار زمن ووقت نقطة التصميم ليوم صيفي عند الظهيرة (مثلا يوم 21 يونيو في النصف الشمالي من الكرة الأرضية) لأن المخرج الحراري للمجمعات المتجهة شمال – جنوب تكون أقصى عند هذا الزمن و التاريخ.

إذا صمم الحقل الشمسي عند يوم شتوي، عندئذ يكون من الضروري الإحتياج لنظام تخزين حراري كبير و ذلك لتجنب زيادة الطاقة الحرارية الناتجة في الصيف.

بمجرد تحديد وقت وتاريخ نقطة التصميم، وتحديد العميل للموقع الجغرافي، يجب عندئذ على المصمم فرض حالات الطقس (مثلا الإشعاع الشمسي المباشر و درجة الحرارة المحيطة) عند نقطة التصميم. يجب فرض الطاقة الحرارية الإسمية المصدرة من الحقل الشمسي و كذلك درجات حرارة المدخل/المخرج للحقل والتي تغذي مجموعة القوى أو عمليات صناعية حرارية.
تتراوح درجات حرارة المدخل / المخرج للمحطات الحرارية الشمسية تقريبا بين 393°C و 293 °C ، لأن الزيوت الحرارية المستخدمة كمائع تشغيل تتحلل بسرعة عند درجة حرارة أعلى من398°C ، و تكون أقصى كفاءة كلية للمحطة عند خطوة درجة حرارة حوالي 100°C في الحقل الشمسي.

إختيار مائع التحويل الحراري

يعتبر إختيار مائع التحويل الحراري لحقل شمسي "حوض قطع مكافئ" من الأهمية في مرحلة التصميم. من الشائع إستخدام الزيت الحراري في مجمعات حوض القطع المكافئ لدرجات الحرارة أعلى من 200°C . يمكن إستخدام المياه كسائل بضغطه إلى قيمة أعلى من ضغط التشبع المطلوب داخل أنابيب المستقبل و المواسير عند درجات حرارة التشغيل هذه، و التي تحتاج مواسير و نقط ربط أقوى و بالتالي إرتفاع تكاليف المجمعات و الحقل الشمسي.
لدرجات الحرارة أقل من 200°C، إما يستخدم خليط من المياة / جليكول الإثيلين(ethylene glycol) أو مياة سائل مضغوط، كمائع تشغيل لأن المطلوب الحفاظ على المائع عند ضغط متوسط في المرحلة السائلة.
توجد زيوت حرارية متعددة تستخدم كمائع لتحويل الحرارة لمجمعات حوض القطع المكافئ. يجب إختيار النوع المناسب من الزيت، و الذي له أقصى درجة حرارة (max bulk temperature) مع ضمان الصانع بإستقرار الزيت. والزيوت الأكثر شيوعا و المستخدمة في مجمعات حوض القطع المكافئ و التي تصل درجة حرارتها إلى 395°C هي خليط من:

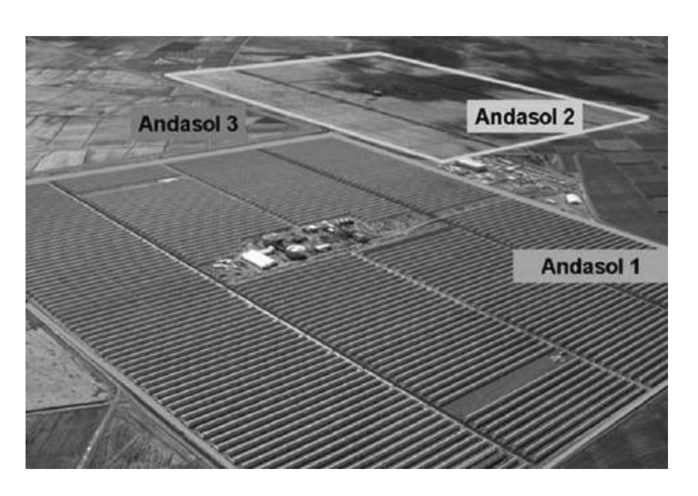
- 73.5% diphenyl oxide
- 26.5 % diphenyl (Dowtherm A or VP-1 thermal oil)

هذه الزيوت لها نقطة إنصهار بالغة الحد الأدنى من الإنخفاض.
تكون المشكلة الرئيسية لهذا النوع من الزيت أن له درجة حرارة تبلور عالية 12° C (crystallization temperature) ، و لذا تحتاج إلى نظام حرارة

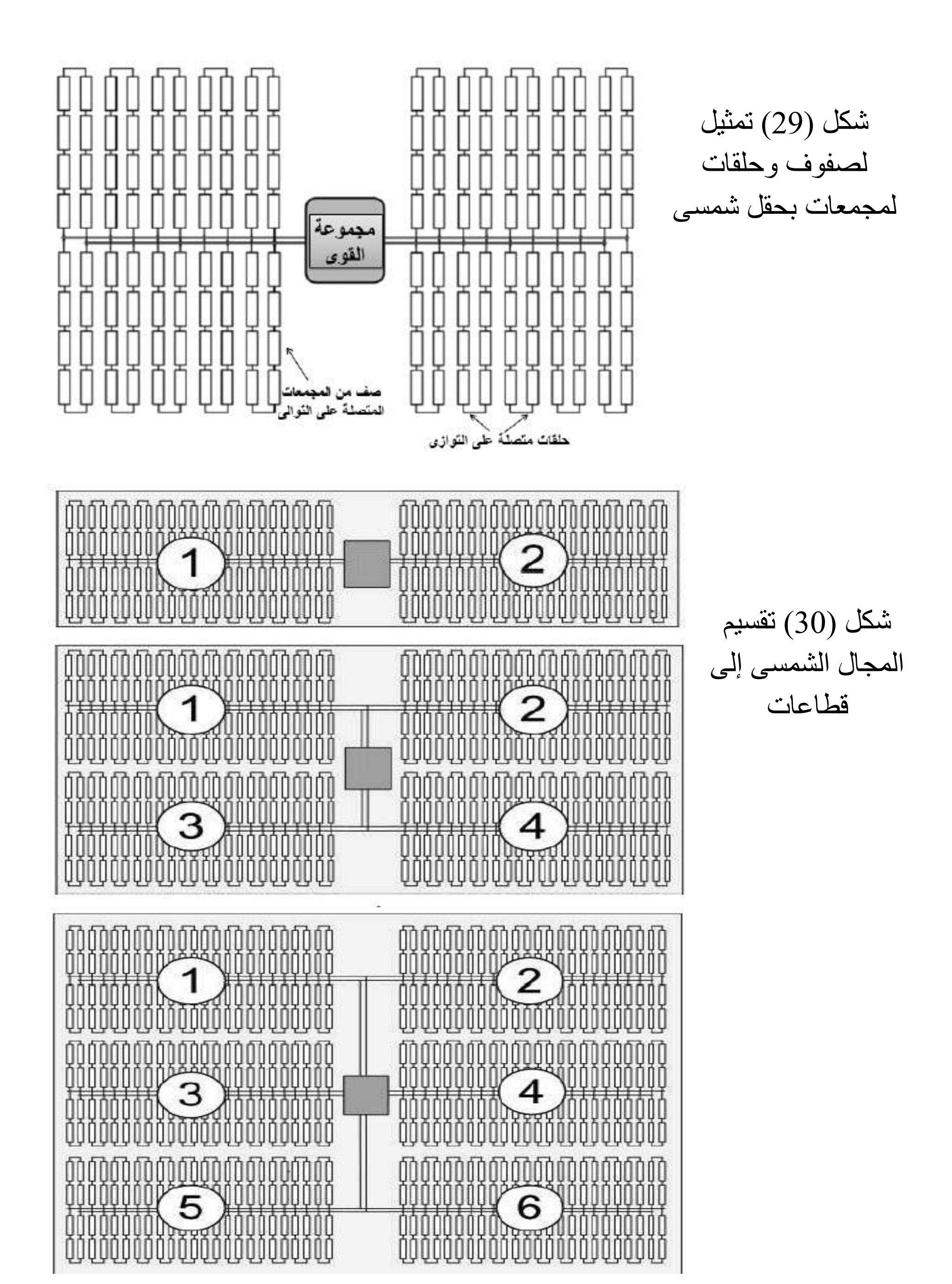
مساعد إذا إنخفضت درجة حرارة زيت الأنابيب إلى أقل من هذه الحدود.
توجد أنواع أخرى من الزيوت الحرارية لها درجات تشغيل أعلى قليلا و درجة حرارة تجمد (solidification) أقل (مثلSyltherm 800)، و هي زيوت مرتفعة التكاليف.

توصيل المجمعات بالحقل الشمسي

يتكون الحقل الشمسي من عدد كبير من المجمعات، في شكل حلقات متصلة على التوازي و كل حلقة تتكون من صفين تحتوي على مجمعات متصلة على التوالي.
يبين شكل (28) حقل شمسى لمحطة من أول محطات المركزات الشمسية التجارية(حوض القطع المكافىء) بأسبانيا بسعة 150 MW
ويوضح شكل (29) تمثيل لصفوف وحلقات لمجمعات بحقل شمسى. تقسم مجمعات الحقل الشمسى إلى قطاعين أو أربعة قطاعات أو ستة قطاعات اعتمادا على حجم الحقل، الشكل (30) يوضح تقسيم المجال الشمسى إلى قطاعات.



شكل (28) من أول محطات المركزات الشمسية التجارية
(حوض القطع المكافىء) بأسبانيا بسعة 150 MW



شكل (29) تمثيل لصفوف وحلقات لمجمعات بحقل شمسى

شكل (30) تقسيم المجال الشمسى إلى قطاعات

أ- المجمعات المتصلة على التوالي في الصف

يعتمد عدد المجمعات المتصلة على التوالي لكل صف على سريان الكتلة الإسمي / صف (nominal mass flow / row)، كلما كان السريان أعلى كلما كان عدد المجمعات المتصلة على التوالي أكثر، و ذلك لإجتياز الإختلاف الأسمي لدرجة الحرارة بين مدخل و مخرج الصف.

إن سبب إستخدام عدد كبير من المجمعات متصلة على التوالي في الصف، هو أن المجمع الواحد لا يكون له القدرة على تجهيز إختلاف درجة حرارة عالية بالكفاية إذا كان سريان الكتلة مائع التشغيل عالي بالكفاية لضمان عامل تحويل حرارة جيد.

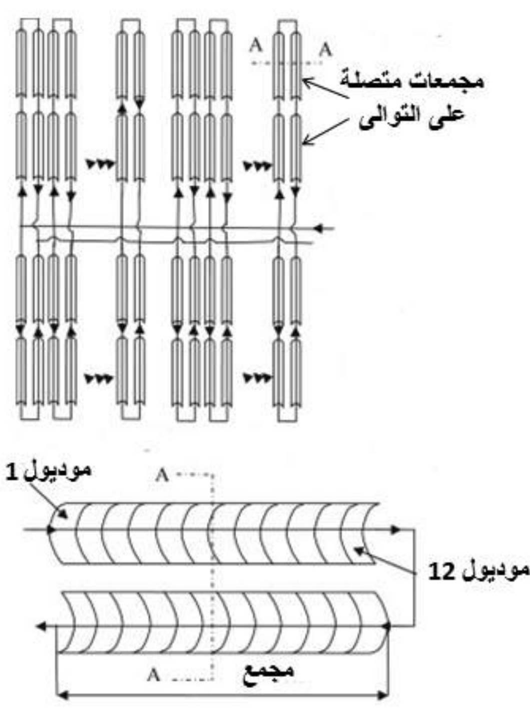
يقابل سريان الكتلة العالية إختلاف درجة حرارة أقل و التي تجهز بمجمع حوض قطع مكافئ واحد عند نقطة التصميم.

و عليه نحصل على عدد المجمعات المتصلة على التوالي في كل صف بقسمة، إختلاف درجة الحرارة بين مدخل و مخرج الحقل الشمسي، على إختلاف درجة الحرارة التي يمكن الحصول عليها من مجمع واحد عند نقطة التصميم.

كمثال يستخدم غالبا في مجمعات حوض القطع المكافئ حاليا طراز EuroTrough-150 و الذي يصنف بالآتي:

- طول الصف 600 متر (يحتوي على 4 مجمعات بطول 150 متر أو 6 مجمعات بطول 100 متر متصلين على التوالي)
- سريان الكتلة للزيت الحراري المطلوب لزيادة درجة الحرارة بـ 100°C في صف المجمعات و التي تقابل توصيات إنخفاض الضغط و معامل تحويل الحرارة مع تكاليف مناسبة للأنابيب
- تكون نقطة التصميم لسريان كتلة المائع لكل صف حوالي 5Kg/s و مرحلة درجة الحرارة لكل مجمع 25°C

ويوضح شكل (31) مجمعات متصلة على التوالى وتوصيل صفين مجمعات فى حلقة واحدة ومكونات المجمع من 12 موديول



شكل (31) توصيل صفين مجمعات فى حلقة واحدة

ب- الصفوف المتصلة على التوازي

بعد تحديد عدد المجمعات المتصلة على التوالي بالصف، يتم تحديد عدد الصفوف المتصلة على التوازي بالحقل. يعتمد عدد الصفوف على القدرة الحرارية المطلوبة لتغذية العمليات الصناعية المستهدفة.

ببساطة يحدد عدد الصفوف كالآتي: (القدرة الحرارية المنتجة من الحقل الشمسي / القدرة الحرارية الموردة من صف واحد عند نقطة التصميم)

يلاحظ أن لمحطتي مركزات شمسية حرارية لها نفس القدرة، يختلف مقاس الحقل الشمسي لكل منهما إعتمادا على وجود تخزين حراري أم لا.

وعلى سبيل المثال:

- محطة مركزات شمسية قدرة 50 MW تحتوي على نظام تخزين حراري

بطاقة 1GWh، يتكون الحقل من 155 صف، كل صف يحتوي على 4 مجمعات، و مساحة المجمعات الكلية 510000 متر مربع.

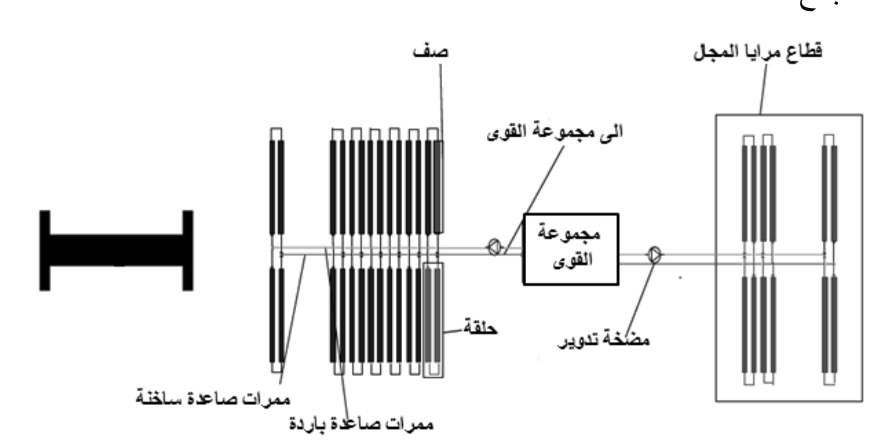
- محطة مركزات شمسية قدرة 50 MW لا تحتوي على نظام تخزين حراري، يتكون الحقل من 88 صف، كل صف يحتوي على 4 مجمعات ، و مساحة المجمعات الكلية 288000 متر مربع.

سبب هذا الإختلاف أن حقل المحطة الشمسية المركزية المحتوية على نظام تخزين حراري لا يغذي فقط مجموعة القدرة (PB) بالطاقة الحرارية و لكن يقوم أيضا بتغذية نظام التخزين الحراري حتى يحافظ على تشغيل مجموعة القدرة بالحمل الكامل لمدة 7.5 ساعة بعد غروب الشمس. أي أنه بالرغم من نفس القدرة المقننة لكلتا المحطتين إلا أن الحقل الشمسي لكل منهما يختلف واقعيا ، بالإضافة لإختلاف عدد ساعات التشغيل السنوية.

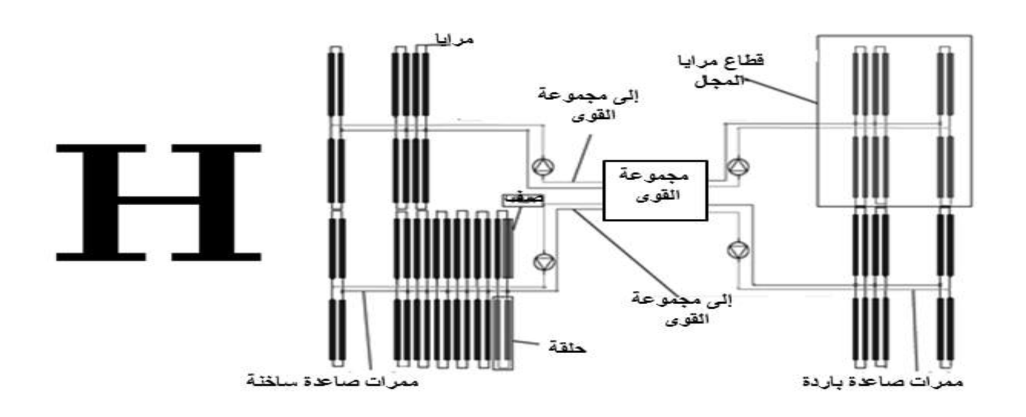
ويمكن ترتيب مكونات الحقل الشمسى على شكل حرف (I) أو حرف (H)

يوضح شكل (32) ترتيبة مجال شمسى على شكل حرف (I)، وفيه معدل السريان الكلى مقسم على القطاعين

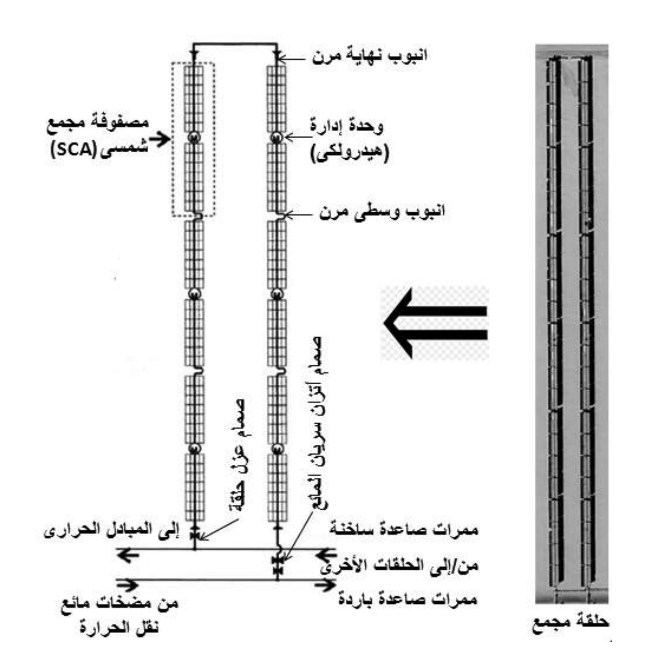
ويوضح شكل (33) ترتيبة مجال شمسى على شكل حرف (H)، وفيه معدل السريان الكلى مقسم على 4 قطاعات، و يبين شكل (34) مكونات تفصيلية لحلقة مجمع



شكل (32) ترتيبة مجال شمسى على شكل حرف (I)



شكل (33) ترتيبة مجال شمسى على شكل حرف (H)



شكل (34) مكونات تفصيلية لحلقة مجمع

حساب حجم الحقل الشمسي و القدرة المقننة للمحطة

يتم تحديد العاملين الآتيين أولا:

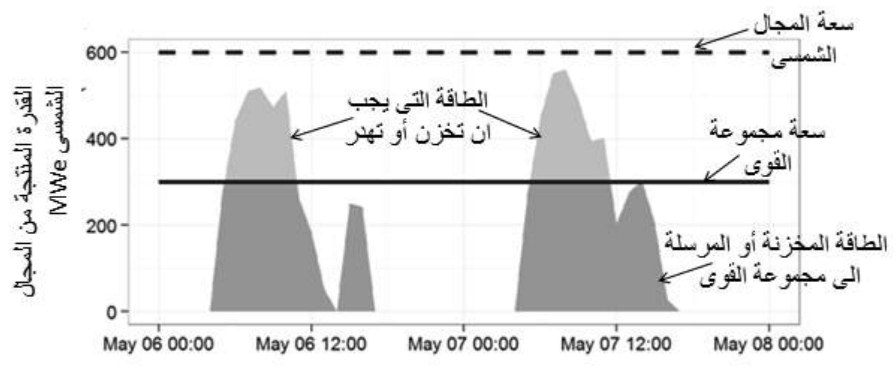
1- **المضاعف الشمسي (Solar Multiple) (SM)**

هو النسبة بين المخرج الحراري للحقل الشمسي عند نقطة التصميم (تعرف عادة نقطة التصميم بأنها نقطة الظهيرة في يوم صيف في نصف الكرة الشمالي) و الطاقة الحرارية المطلوبة لتغذية مجموعة القوى (PB) عند القدرة الإسمية. وعليه فإن الحقل الشمسي الآن يستخدم مضاعفا شمسيا أكبر لنفس مقنن مجموع القوى (PB).

كمثال للمحطات الشمسية قدرة 50 MW عند نفس خط العرض الجغرافي

- في حالة عدم وجود نظام تخزين حراري فإن 1.3 : 1.15 = SM
- في حالة وجود نظام تخزين حراري (1GWh) فإن SM = 2

يوضح شكل (35) محطة مركزات شمسية بها مقنن مجموعة القوى 300 MW ولها SM= 2 أى أن أقصى طاقة كهرباء حرارية منتجة من الحقل الشمسى ضعف المقنن الحرارى لمجموعة القوى، هذه الزيادة تخزن فى حالة وجود نظام تخزين أو تهدر فى حالة عدم وجود نظام تخزين.



شكل (35) التغير فى الطاقة الكهربائية الحرارية المنتجةمن الحقل الشمسى خلال يومين

2- عامل السعة (capacity factor)

هو النسبة بين عدد الساعات المكافئة سنويا فقط عند الحمل الشمسي الكامل، و أقصى عدد ساعات تشغيل للمحطة (365 day*24 hr= 8760 hr).

مع ملاحظة أن لانظمة التخزين الحراري تزيد عدد ساعات التشغيل، و لذا يكون عامل السعة لمحطة تحتوي على تخزين حراري أكبر منه للمحطة غير المحتوية على تخزين حراري. مثلا لمحطة مركزات شمسية قدرة 50 MW وتخزين حراري 1 GWh فإن عامل السعة يساوي 0.4 بينما يساوي 0.22 في حالة عدم وجود تخزين حراري.

تحديد مكونات ترتيبة مجمعات الحقل الشمسي

لتحديد عدد وترتيب مجمعات الحقل الشمسى تتبع الخطوات التالية :

1. حساب الحرارة المكتسبة المفيدة للمجمع الواحد (KW)
2. حساب درجة حرارة مخرج مجمع واحد (°C)
3. حساب الطاقة الحرارية الكلية من الحقل الشمسي (KWth)
4. حساب ترتيبة المجمعات للحقل الشمسي (عدد الحلقات والطاقة الحرارية الكلية)

فيما يلى توضيح كل خطوة :

(1) حساب الحرارة المكتسبة المفيدة للمجمع الواحد:

$$Q_u = F_R A_a [S - (A_r / A_a) U_L (T_i - T_a)]$$

حيث

Q_u= الحرارالمكتسبة المفيدة (useful heat gained) (KW لكل مجمع)

F_R= عامل تحرك الحرارة بالمجمع (collector heat removal factor)

A_a= مساحه فتحة المركز (aperture area of concentrator)(m^2)

A_r= مساحه المستقبل (receiver area)(m^2)

S= الإشعاع الشمسي الممتص (absorbed solar radiation)(w / m^2)

= الإشعاع الساقط على الموقع المختار عند نقطة التصميم

U_L= معامل فقد الحرارة (Heat loss coefficient) (w / m².°C)

T_i= درجة حرارة مدخل المائع (fluid inlet temperature) (°C)

T_a = درجة الحرارة المحيطة (ambient temperature)(°C)

عامل تحرك الحرارة بالمجمع (F_R)

(Collector heat removal factor)

يعرف هذا العامل بأنه نسبة الطاقة المفيدة المحسوبة باستخدام (Ti – Ta)

إلى الطاقة المفيدة المحسوبة باستخدام (Tpm – Ta)

أو هو النسبة بين الحرارة المنقولة الفعلية إلى أقصى حرارة منقولة ممكنة .

وتكون قيمة هذا العامل < 1 (وليس له وحدة)

حيث :

Tpm = متوسط درجة حرارة الممتص(°C) (absorber)

(2) حساب درجة حرارة مخرج مجمع واحد

$$\mathbf{T_o = T_i + Q_u / \dot{m} c_p}$$

حيث

T_o =درجة حرارة المخرج (outlet temperature) (°C)

T_i = درجة حرارة المدخل (inlet temperature) (°C)

$\dot{m}$ = معدل سريان كتلة مائع نقل الحرارة(mass flow rate of HTF) (kg/s)

c_p= سعه الحرارة النوعية لمائع نقل الحرارة

(specific heat capacity of HTF)(J/kg.°C)

فيما يلى بعض الأمثلة وحلها لحساب عدد من المتغيرات المطلوبة، فإذا أخذنا مثال لحساب عدد المجمعات اللازمة للحصول على ارتفاع في درجة حرارة المدخل بـ 100℃ وذلك باستخدام بيانات المجمع الآتية:

T_i =239℃

$\dot{m}$ =8kg/s

Q_u = 550(Kw /collector)

Kwh=3.6× 10³ KJ

c_p =2450J/kg.℃= 2.45×3.6×10³ kwh/kg.℃

فإننا يجب ان نتبع الخطوات التالية :

$$T_o = 239 + \frac{(550\ kw)}{(8kg/s)(2450J/\ kg.℃)}$$

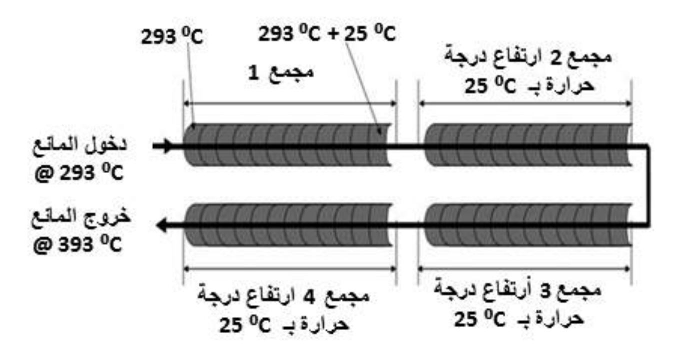
$$= 239 + \frac{(550\ kw)}{\left(\frac{8kg}{(60\times60)hr}\right)(2.45\times3.6\times10^{3}kwh/kg.℃)}$$

$$= 239+28\ ℃$$

أي ترتفع درجة حرارة مخرج المجمع ب 28℃ عن درجة حرارة المدخل وهي 239℃ وحيث أن المطلوب زياده درجة الحرارة بـ 100℃ إذن

عدد المجمعات المطلوبة 100℃/28℃ = 3.5

لذا يختار عدد المجمعات = 4 كما فى شكل (36)



شكل (36) حلقة مجمعات ترفع درجة حرارة مائع نقل الحرارة بـ 100 ⁰C

(3) حساب الطاقة الحرارية الكلية للحقل الشمسي (P_{th})

$$P_{th} = (P_{el}/\eta_{PB}) + \text{electric parasitic} + \text{SF piping losses} + \text{other losses}$$

حيث

P_{th} = الطاقة الحرارية للحقل الشمسي

(Thermal power from solar collector field)

P_{el}= صافي سعة المولد (net capacity)
η_{PB}=كفاءة مجموعة القوى (power block efficiency)
Electric parasitic = الطفيليات الكهربائية
SF piping losses = مفقودات مواسير الحقل الشمسى

مثال:

احسب الطاقة الحرارية الكلية طبقا للبيانات الآتية :

P_{el} =30MW ، $\eta_{gen.}$= 0.96

η_{boil}= 0.9 ، $\eta_{turb.}$= 0.37

Electric parasitic = الطفيليات الكهربائية= 5.8 MW

SF piping losses =مفقودات مواسير الحقل الشمسي = 6.2MW

Other losses = مفقودات أخرى = 12.36 MW

الحل:

$$P_{th}= 30/ (0.96\times0.9\times0.37) +5.8+6.2+12.36$$
$$=118.2\ MW_{th}$$

(4) حساب مكونات ترتيبة مجمعات الحقل الشمسي

لتحديد ترتيبة الحقل الشمسى يلزم :

- قدرة مخرج المجمع الواحد
- عدد المجمعات فى الحلقة
- الطاقة الحرارية الكلية للحقل الشمسى

$$\text{عدد الحلقات المطلوبه} = \left(\frac{\text{الطاقة الحرارية الكليه من الحقل الشمسي}}{\text{قدرة مخرج المجمع الواحد}}\right) / (\text{عدد المجمعات في الحلقة})$$

مثال :

بإستخدام البيانات في الأمثلة السابقة إحسب ترتيبة المجمعات للحقل الشمسي

الحل :

الطاقة الحرارية الكلية $= P_{th} = 118.2\ MW_{th}$

قدرة مخرج المجمع الواحد $= Q_c = 550\ kW\ /collector$

عدد المجمعات في الحلقة $= 4$

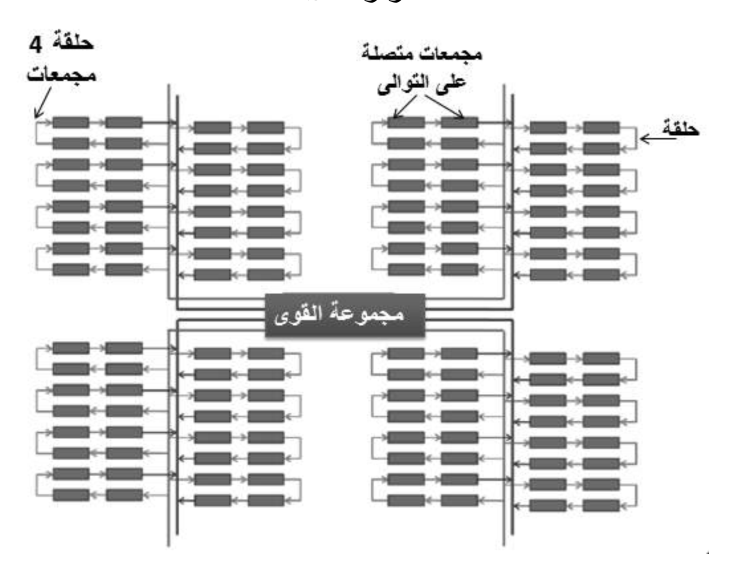
$$\text{No. of loops} = \frac{118.2\times10^3}{(550)(4)} \approx 54\ \text{loop}$$

بإختيار ترتيبة تحتوى على عدد 56 حلقه حتى يمكن توزيع عدد المجمعات في إتزان هيدروليكي منتظم في النظام.

وعلى ذلك تصبح قدرة المخرج المنتجة من عدد 56 حلقه

$P_{el} \approx 31.1\ MW$

يوضح شكل (37) رسم تخطيطى لترتيبة مجمع شمسي تحتوى على حلقة طراز LS-2



شكل(37) رسم تخطيطى لترتيبة مجمع شمسي تحتوى على حلقة طراز LS-2

مثال:

مساحة متاحة لمحطة شمسية حوض قطع مكافئ $=1.5\ km^2$

ا- إذا كانت سعة مجموعة القدرة = 50 MW

ما قيمة المضاعف الشمسي (SM)

ب- إذا كان النظام بدون تخزين، كم سعة مقنن القدرة الكهربائية للمحطة

الحل :

أ- $\boldsymbol{A = 4\ A_{ap}}$

حيث $\boldsymbol{A}$=المساحة الكلية للمحطة الشمسية

$\boldsymbol{A_{ap}}$(km²)= مساحة فتحات المجمعات(km²)

$$\boldsymbol{A_{ap}} = \frac{\boldsymbol{P_{el}}*\mathbf{SM}}{\boldsymbol{\eta}*\boldsymbol{G_{b.coll}}} \ ,$$

$\boldsymbol{\eta}$=25%, $\boldsymbol{P_{el}} = 50\text{MW}$, $\boldsymbol{G_{b.coll}} = 800 w/m^2$

$$1.5\ \text{km}^2 = 4\left(\frac{50\text{MW}*\boldsymbol{SM}}{0.25*(800w/m^2)}\right)$$

$$\mathbf{SM} = \left(\frac{(1.5\ \text{km}^2)*(0.25)*(0.8kw/m^2)}{4*(50\text{MW})}\right)$$

$\therefore$**SM**=1.5

ب.

SM=1

$$1.5\ \text{km}^2 = 4\left(\frac{\boldsymbol{P_{el}}*(1)}{0.25*(800w/m^2)}\right)$$

$\boldsymbol{P_{el}}$=75 MW

الباب العاشر
اقتصاديات المركزات الشمسية الحرارية
Economics of Solar Thermal Concentrates

تكاليف الطاقة الكهربائية طبقا لمصدر الطاقة المولدة منه

:(Cost of electricity by source)

هي حساب تكلفة انتاج الكهرباء عند نقطة التوصيل بالشبكة العامة للكهرباء أو إلى الحمل وتقاس بوحدة نقدية/ك و س، وذلك خلال العمر الافتراضي للمحطة أو التكنولوجيا المنتجة للكهرباء آخذين فى الإعتبار كلا من التكلفة التأسيسية (رأس المال الأولي)، معدل الخصم، عامل السعة بالإضافة إلى تكلفة التشغيل المستمر والوقود والصيانة. تكون أهمية حساب قيمة التكلفة لمصادر الطاقة المختلفة في أنها تعطي مرجعية تساعد صانعي القرار على توجيه الاستثمارات طبقا لاختيار تكنولوجيا الطاقة المختلفة

يوضح جدول (1) تكاليف الطاقة الكهربائية لمصادر الطاقة المختلفة
(Source : EIA, NREL)

جدول (1) تكاليف الطاقة الكهربائية لمصادر الطاقة المختلفة

(Source : EIA ، NREL، 2012)

(http://www.marketoracle.co.uk/Article38024.html)

المصدر	التكلفة ($/kwh)
فحم	0.036
نووية	0.024
كهرومائية	0.092
تربينة غازية	0.049
رياح (offshore)	0.04 : 0.15
رياح (onshore)	0.07 : 0.20
شمسى، فوتوفلتية	0.15 : 0.59
شمسى، مركزات	0.06 : 0.30
الطاقة الحرارية الأرضية	0.04 : 0.13

تكلفة الطاقة ذات المستوي الواحد :

(Levelized cost of Energy) (LCOE)

أو (Levelized Energy Cost) (LEC)

(ويعرف أيضا بـ التكلفة النسبية للطاقة)

هو صافي القيمة الحالية لتكلفة وحدة الكهرباء علي مدي عمر أصول معدات إنتاج الكهرباء.

وهو تقيم اقتصادي من الدرجة الأولي للتنافسية من حيث تكلفة نظام إنتاج الكهرباء والتي تشمل جميع التكاليف علي مدي عمر تشغيل النظام مثل: الإستثمارات الأولية، التشغيل والصيانة، تكلفة رأس المال.

إن معادلة حساب LCOE هي أداة تحليلية واحدة والتي يتم إستخدامها لمقارنة التكنولوجيات البديلة عند اختلاف مقياس التشغيل، الاستثمارات، والدورة الزمنية

للتشغيل. مثلا تستخدم المعادلة LCOE لمقارنة تكاليف الطاقة المنتجة من محطات المركزات الحرارية ومحطات الإنتاج بالوقود الأحفوري أو أي نوع آخر من تكنولوجيات إنتاج الطاقة.
تحسب تكلفة الطاقة من القيمة الحالية لكل التكاليف علي مدي عمر تشغيل الأصول مقسوما علي الناتج الإجمالي للأصول في مجال الطاقة الكهربائي.

أى ان:
التكلفة النسبية للطاقة (LCOE) = (مجموع التكاليف خلال عمر التشغيل) ÷ (مجموع الطاقة الكهربائية المنتجة خلال عمر التشغيل)

ولذا لحساب التكلفة النسبية للطاقة يحتاج لجميع البيانات الآتية خلال عمر التشغيل:

- تكاليف الاستثمارات
- تكاليف الصيانة والتشغيل
- تكاليف الوقود
- كمية الطاقة الكهربائية المنتجة
- معدل الخصم
- عمر التشغيل المتوقع للنظام أو لمحطة الكهرباء

عادة يتم حساب التكلفة النسبية للطاقة على مدار 20 إلى 40 سنة بوحدات : دولار/ م وس أو يورو/ ك وس أو لكل م و س، ومع ذلك ، ينبغي توخي الحذر عند مقارنة مختلف دراسات التكلفة النسبية للطاقة ومصادر المعلومات حيث أن التكلفة النسبية للطاقة الخاصة بمصدر الطاقة المعطى تعتمد بشكل كبير على الافتراضات، وشروط التمويل والتطوير التكنولوجي المحلل بصفة خاصة. ولذا فإن المتطلب الأساسي للتحليل هو وجود بيان واضح لقابلية التحليل على التطبيق بناءاً على الافتراضات المبررة.
يوضح جدول (2) القيمة المتوقعة لتكاليف مصادر الانتاج الجديدة (2018)، ويتضح من الجدول إن أعلى تكلفة متوقعة لتكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية تكون من المحطات الشمسية الحرارية.

جدول (2) القيمة المتوقعة لتكاليف مصادر الإنتاج(2018)

نوع المحطة	عامل السعة %	التكلفة المتوسطة النسبية للطاقة ($/Mwh) فى سنة2011 للمحطات الداخلة بالخدمة فى 2018				
		تكلفة رأس المال النسبية	التكلفة الثابتة للصيانة والتشغيل	التكلفة المتغيرة للصيانة والتشغيل (والوقود)	استثمارات النقل	إجمالى التكلفة النسبية للطاقة
الفحم التقليدى	85	65.7	4.1	29.2	1.2	100.1
الفحم المتقدم	85	84.4	4.8	30.7	1.2	123.0
الفحم المتقدم مع CCS	85	88.4	8.8	37.2	1.2	135.5
الغاز الطبيعى: الدورة المجمعة الاعتيادية	87	15.8	1.7	48.4	1.2	67.1
الغاز الطبيعى: الدورة المجمعة المتقدمة	87	17.4	2.0	45.0	1.2	65.6
الغاز الطبيعى: CC المتقدمة مع CCS	87	34.0	4.1	54.1	1.2	93.4
الغاز الطبيعى: توربين الاحتراق التقليدى	30	44.2	2.7	80.0	3.4	130.3
الغاز الطبيعى: توربين الاحتراق المتقدم	30	30.4	2.6	68.2	3.4	104.6
نووية متقدمة	90	83.4	11.6	12.3	1.1	108.4
أرضية حرارية	92	76.2	12.0	0.0	1.4	89.6
كتلة حيوية	83	53.2	14.3	42.3	1.2	111.0
رياح (offshore)	34	70.3	13.1	0.0	3.2	86.6
رياح (onshore)	37	193.4	22.4	0.0	5.7	221.5
خلايا شمسية	25	130.4	9.9	0.0	4.0	144.3
شمسية حرارية	20	214.2	41.4	0.0	5.9	261.5
كهرومائية	52	78.1	4.1	6.1	2.0	90.3

(Source:https://www.marefa.org/)

تكاليف إنتاج الطاقة من محطات المركزات الشمسية الحرارية

إن تكاليف انتاج الطاقة الكهربائية حاليا من تكنولوجيا المركزات الشمسية الحرارية تكون أعلى من الانتاج بإستخدام التكنولوجيات (الوقود الأحفورى – النووي – الرياح – الخلايا الشمسية ....). أثبتت الدراسات والأبحاث وجود فرص متعددة لإنخفاض التكلفة خاصة مع التطور الواسع لأحجام المحطات الكبيرة، بالاضافة إلى التحسن المسستمر فى تكنولوجيا CSP، ومن المتوقع إنخفاض التكاليف بنسبة كبيرة جدا. تعتمد اقتصاديات إنشاء محطات CSP أساسا على حجم المحطة، يعرف الحجم بدلالة قدرة المخرج والذى يرتبط مباشرة بمساحة الأرض المستخدمة، حاليا نجد أن أقل قدرة لمحطة:

- طبق سترلنج قطع مكافئ : 1 MWe
- برج الطاقة المركزي : 10 MWe
- حوض قطع مكافئ : 50 MWe

ونجد أن التكلفة التقديرية لمحطة طبق قطع مكافىء مستقل حوالى 5000 € / kw_e بينما تكون التكلفة لأنظمة البرج المركزى وحوض القطع المكافىء أقل من 3000 €/ kw_e وحاليا تستهدف الدول الانتاج بقدرات بين 200 Mwe &100 Mwe والتى ستؤدى إلى انخفاض التكاليف ومن المتوقع عند إجراء تطورات فى تكنولوجيا المركزات الشمسية الحرارية ستنخفض التكاليف بنسبة تصل إلى 50 % هذه الإجراءات تعتمد على عدة عوامل تبعا لنوع التكاليف ، والتى تنقسم إلى:

- التكاليف الشمسية (Solar costs) وهى تعنى تكاليف المهمات المتعلقة بالشمس، والتى من المتوقع أن تنخفض عند تحقق الانتاج بالجملة مع تطور أبحاث أنظمة المرايا (حيث تمثل المجمعات الشمسية حاليا نسبة 40 % : 30 % من التكاليف الاستثمارية للمحطة) ويكون ذلك مصحوبا بتطور الأنظمة البصرية الجديدة .
- التكاليف غير الشمسية (Non - Solar costs) وهى تعنى باقى مهمات المحطة، تنخفض هذه التكاليف بزيادة كفاءة أنظمة النقل الحرارى، وزيادة كفاءة دورة مجموعة القوى، وإنتاج البخار المباشر بالتكامل مع الأنظمة التقليدية، وزيادة درجة حرارة البخار بغرض تحسين كفاءة دورة البخار لإنتاج الكهرباء.

مثال لذلك، أن التكلفة التقديرية النسبية للطاقة (LCOE) لمحطة المركزات الشمسية الحرارية قدرة 100 MWe حوالى 12 €/ kwh يمكن أن تنخفض التكاليف عمليا عند الانتاج بالجملة لحقل هليوستات وزيادة القدرة الى 200 Mwe أيضا بالزيادة البسيطة فى درجة حرارة التشغيل 580 °C مصحوبا بتحسين تصميم الهليوستات يمكن أن تنخفض التكاليف بنسبة 10% وتصل التكلفة إلى 9 €/ kwh خاصة إذا أمكن التغلب على حدوث تآكل بدون ارتفاع كبير فى التكاليف .

تكاليف محطات حوض قطع مكافئ

فى محطات حوض قطع مكافىء تكون التكاليف، تقريبا منسوبة إلى التكاليف الكلية كالآتى:

- تكلفة الحقل الشمسى حوالى من 60% الى 80%
- تكلفة مجموعة القوى (بدون تخزين طاقة) حوالى من 10% الى 15%
- فى حالة وجود تخزين طاقة تكون التكلفة حوالى من 15 % الى20%
- باقى التكاليف تكون للأعمال المدنية والبنية الأساسية للموقع وأية أعمال أخرى

لتخفيض تكاليف محطات حوض قطع مكافىء، يؤخذ الآتى فى الإعتبار:

- اختيار الموقع المثالى للمحطة
- الحجم المثالى للمحطة
- زيادة سعة التخزين وعامل السعة
- تحسين التكنولوجيا المستمر
- زيادة التنافسية
- زيادة معدلات المعرفة

توضح الجداول من رقم (3) الى رقم (13) تكاليف المكونات والأعمال لمحطة حوض قطع مكافىء لقدرات مختلفة ولمحطات قائمة بالخدمة وبعضها لعدد ساعات تخزين محددة و عامل شمسي (SM) محدد، كذلك تكاليف مكونات الحقل الشمسى و تكاليف الصيانة والتشغيل

جدول (3) نسبة تكاليف المكونات والاعمال لمحطة حوض قطع مكافىء (1991 - SEGS) 80 Mw

البند	نسبه المشاركة
الحقل الشمسي (المعدات)	37%
الحقل الشمس (الأعمال المدنية + الانشاءات)	7%
نظام مائع نقل الحرارة (المعدات)	8%
نظام مائع نقل الحرارة (الأعمال المدنية والانشاءات)	3%
أعمال الموقع	3%
الخدمات	7%
مجموعه القوي (المعدات)	15%
مجموعه القوي (الأعمال المدنية + الانشاءات)	*4%*
باقي المكونات (المعدات)	10%
باقي المكونات (الأعمال المدنية + الانشاءات)	6%

(Source: DeutschesZentrum (DLR)

جدول (4) نسبه تكاليف مكونات محطة حوض قطع مكافئ 100 MWe، عدد 12 ساعة تخزين و 2.5 عامل شمسي (SM)

البند	نسبه المشاركة
التركيبات/الانشاءات	2%
نظام تجميع الإشعاع الشمسي	58%
نظام التخزين الحراري	23%
الغلاية (مولد البخار)	3%
مجموعه القوي	14%

(Source: NREL 2004)

جدول (5) نسبه تكاليف مكونات الحقل الشمسى لمحطة حوض قطع مكافئ (2011)

نسبه المشاركة	البند
14 %	التركيبات
14 %	المرايا
27 %	الهيكل المعدني
4 %	الزيوت الحرارية
11 %	الانابيب
11 %	الاساسيات
6 %	تجهيزات الارض
13 %	أعمال أخري

(Source: www.Jeonardo-energy.org/)

جدول (6) قيمة تكاليف مكونات الحقل الشمسى لمحطة حوض قطع مكافئ 100 MWe، عدد 12 ساعة تخزين، و 2.5 عامل شمسي (SM)

نسبه المشاركة	البند
20%	المستقبل
19%	المرايا
29%	الهيكل المعدني
6%	وسيلة التتبع
5%	أنابيب التوصيل
7%	التحكمات
3%	أنابيب الممرات الصاعدة
4%	الانشاءات
3%	مائع نقل الحرارة
4%	أعمال أخري

(Source: NREL 2004)

جدول (7) نسبة تكاليف مكونات محطة حوض قطع مكافئ 50 MWe، عدد 7 ساعة تخزين

البند	نسبه المشاركة
الحقل الشمسي	%30
التخزين	%9
ادارة المشروع	%8
أعمال مدنية	%7
مجموعه القوي	%5
مائع نقل الحرارة	%5
تكاليف مالية	%6
تطوير المشروع	%3
التوصيل بالشبكة	%3
المرتبات	%14
متنوعات	%2
أخري	%8

(Source: IEA 2010)

جدول (8) قيمة تكاليف مكونات محطة حوض قطع مكافئ 50 MWe، وعدد 7.5 ساعة تخزين (Andasol – 1)(محطة)

المكون	التكلفة ($ M)
الحقل الشمسي وعمالة الموقع	62.4
معدات الحقل الشمسي ومائع نقل الحرارة	140.3
نظام التخزين الحراري	38.4
مجموعه القوي	52.0
أخري	71.0
الإجمالي	364

(Source: http://hub.globalccsinstitute.com/)

جدول (9) التكاليف التقديرية لمكونات حقل حوض القطع المكافئ

المكون	التكلفة التقديرية	الوحدة
مرايا القطع المكافئ (السمك العادي لمرايا زجاجية)	28-40	€/m² (لمساحة المجمع)
هيكل صلب (المعدن)	50-65	€/m² (لمساحة المجمع)
مستقبل مفرغ (vacuum receiver)	200-300	€/m (لطول المستقبِل)
الزيت الحراري	3.0-7.0	€/ℓ (لتر)
مجمع حوض القطع المكافئ (مضافا اليه الإنشاءات)	200-240	€/m² (لمساحة المجمع)
إنشاءات الحقل الشمسي (مواسير التوصيل ،نظام التخزين الحراري)	230-290	€/m² (لمساحة المجمع)

(Source: http://www.slidshare.net/Rizwan114/)

جدول (10) التكاليف الاستثمارية لبعض محطات حوض القطع المكافىء

المكون	الوحدة	Sargent & Lundy				Fichtner
		2003		2008		2008
محطة القوى		SEGS VI	T 100	T 100	T 100	T 100
		مختلط	تخزين	بدون تخزين	تخزين	مختلط
هيكل تثبيت	$\$/m^2$	67	67	171	172	160
مستقبلات	$\$/m^2$	43	43	53	53	60
مرايا	$\$/m^2$	43	40	63	63	60
BOP شمسي	$\$/m^2$	234	250	141	141	150
مجموعة قوى/ BOP	$\$/kw_e$	527	306	1183	1183	2500
تخزين حراري	$\$/kw_e$	-	958	-	765	-
التكاليف	M$	92	254	447	671	559
الإستثمارية الكلية	$/kwe	3052	5073	4471	6708	5594

(Source: Fichtner)

جدول(11) التكاليف الاستثمارية لبعض أنواع محطات المركزيات الشمسية الحرارية حوض قطع مكافئ

نوع المحطة	خزان تخزين	عامل السعة %	التكلفة $/kw	أخري (المراجع)
حوض قطع مكافئ	لا تحتوي	20-25%	4600-7100	Hinkley,2011:Turchi: 2010a
محطات مشروع SEGS التي تعمل منذ 1984			3000-4000	Cohen،1999
حوض قطع مكافئ	4-6.5 hrs	>40%	7300-9000	Hinkley,2011:Turchi: 2010a Turchi:2010b،fichtner 2010
حوض قطع مكافئ 2011-2010	لا تحتوي		5500-8000	IRENA، 2012 (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY)
	تحتوي		7500-8500	
حوض قطع مكافئ كبير	تحتوي		4200-8400	IEA، 2010a (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY)

(Source: http://www.etap.org-www.irena.org/)

جدول (12) تكاليف الصيانة والتشغيل لبعض محطات حوض القطع المكافىء

Fichtner	Sargent & Lundy				الوحدة	المكون
2008	2008		2003			
T 100	T 100	T 100	T 100	SEGS VI		محطة قوى
مختلط	تخزين	بدون تخزين	تخزين	مختلط		
120	78	67	115	63	$/kw_e$	التكاليف السنوية للصيانة والتشغيل

(Source: Fichtner)

جدول (13) تكلفة kwh في بعض محطات حوض القطع المكافىء المركزية بالصين (2010)

$/kwh_e$	قدرة المحطة
0.16	100 MW
0.14	1000 MW
0.12	1000 MW (2020)

(Source: Fichtner)

تكاليف محطات برج الطاقة المركزي:

توضح الجداول من رقم (14) الى رقم (17) تكاليف المكونات والأعمال لمحطات برج طاقة مركزي لقدرات مختلفة ولمحطات قائمة بالخدمة وبعضها لعدد ساعات تخزين محددة، كذلك تكاليف هليوستات

ويبين شكل (1) تطور خطوط أنتاج وتكاليف الهليوستات

(www.researchgate.net/publication/224802065_Solar_Thermal_Plants_-_Power_and_Processs_Heat)

جدول (14) تكاليف مكونات محطة برج مركزي 11MW، إسبانيا (PS-10)

المكون	التكلفة (M Euros)
الحقل الشمسي	12.6
مجموعة القوى	8.4
المستقبل	5.25
البرج	1.05
التخزين	1.05
الأرض	0.7
تكاليف غير مباشرة	5.95
الإجمالي	35

(Source: https://hub.Globalccsinstitute.com)

جدول (15) تكاليف مكونات هليوستات 148 m²

البند	التكلفة ($/m²)
موديول مرايا	23.06
هيكل تثبيت	21.21
ميكانيزم تتبع	27.11
التحكم	1.94
مدير كهربي	1.79
توصيلات الحقل	7.4
الإنشاءات	2.28
القاعدة	16.96
فائدة	18.41
ضبط محاور الحقل	6.34

(Source: data taken from (Kolb, 2007))

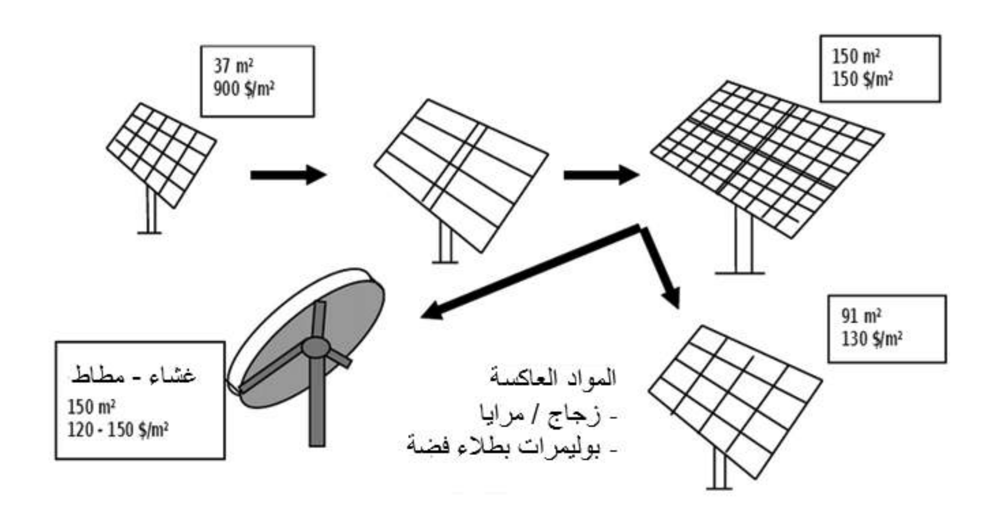
جدول (16) التكاليف الإستثمارية لمحطة برج الطاقة المركزى

نوع المحطة	خزان تخزين	عامل السعة %	التكلفة $/kw	أخرى (المراجع)
برج شمسي	6-9 hrs	41-54 %	6300 - 7700	Hinckley , 2011, Turchi 2010a, Turchi 2010b , Fichtner 2010,IRENA,2012
	12-15 hrs	68-79 %	9000 - 10500	

(Source: www.etsap.org – www.Lrena.org)

جدول (17) التكاليف الإستثمارية لبعض محطات برج الطاقة المركزي

المكون	الوحدة	Sargent &Lundy		Fichtner
		2003	2008	2008
محطة القوى		Solar Tres 13.56 MW	Solar Tres 13.56 MW	Tower 47.25 MW
		تخزين	تخزين	شمسي فقط
الموقع/البنية الاساسية	$/m²	11.6	-	25.3
حقل الهليوستات	$/m²	160	230.6	191.2
المستقبل		280 m²	280 m²	155 MW_{th}
		57143 $/m²	121680 $/m²	151.5 $/$KWh_{th}$
البرج والأنابيب	$/m²	11.6	21.99	18.9
مجموع القوي وباقي المكونات	$/$kw_e$	1397.7	4719.6	1556.6
التخزين الحراري	$/$KW_{th}$	49	24.9	-
التكاليف الاستثمارية الكلية	M$	119	219	214
	$/$kw_e$	8753	16905	4534



شكل (1) تطور خطوط أنتاج وتكاليف الهليوستات

تكاليف محطات طبق سترلينج قطع مكافئ:

يوضح جدول (18) نسبة مشاركة تكاليف مكونات محطة طبق قطع مكافئ

جدول (18) نسبة مشاركة تكاليف مكونات محطة طبق قطع مكافئ

البند	نسبة المشاركة
الحقل الشمسي	38%
مجموعة القوى	37%
المستقبل	7%
الأرض	1%
تكاليف غير مباشرة	17%

(Source: https:// hub. Globalccsinstitute.com)

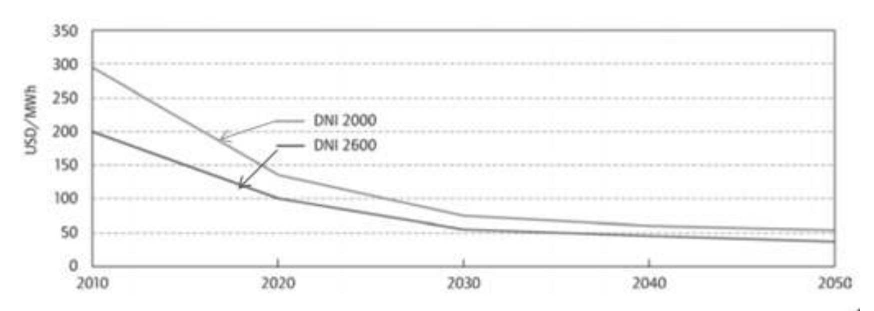
تكلفة الطاقة ذات المستوي الواحد لمحطات CSP:
(Levelized cost of Energy) (LCOE)

نظرا للتغير فى شكل وتناسق محطات المركزات الشمسية الحرارية CSP، فإن تكاليف الإنتاج أو تكاليف الطاقة ذات المستوى الواحد (التكلفة المتوسطة النسبية للطاقة) (بوحدة US)$/Kwh يكون مؤشر أفضل للتكلفة الحقيقية (بوحدة US)$/Mw. يتغير عامل السعة (أو عامل الحمل) فى مدى واسع لمحطات CSP. المحطات ذات نفس مساحة الحقل الشمسى ونفس الطاقة المنتجة سنويا، يمكن أن يختلف حجم المولدات إعتمادا على إحتوائها أو عدم إحتوائها على نظام تخزين الطاقة.

تحسب تكاليف الطاقة من التكاليف المتاحة وبيانات الأداء للمشروعات الكاملة حاليا والمشروعات تحت الإنشاء. تعتمد تكاليف الإنتاج على:

- الإشعاع العادى المباشر (DNI) عند موقع المشروع، والموضحة فى شكل (2)
- حجم المحطة والتصميم المثالى للمحطة
- تكاليف التكنولوجيا
- التحقق من انخفاض التكاليف عند تحسن التكنولوجيا
- زيادة التنافسية
- تأثير معدلات المعرفة

توضح الجدولين (19) & (20) تكاليف الطاقة ذات المستوى الواحد ($/kwh) لمحطات CSP



شكل (2) تقييم تكاليف الطاقة ذات المستوى الواحد ($/Mwh)
لمستوين مختلفين للإشعاع العادى المباشر (DNI)

جدول (19) تكاليف الطاقة ذات المستوى الواحد ($/kwh)

البند	محطات حوض قطع مكافىء	محطات برج الطاقة المركزي	محطات طبق قطع مكافىء	محطات فرسنيل الخطية
التكاليف الحالية	0.3 : 0.75	0.2 : 0.9	----	----
التكاليف المستقبلية	0.06 : 0.08	0.06 : 0.08	0.05 : 0.08	0.06 : 0.08

(Source: www.ifc.org)

جدول (20) تكاليف محطات CSP في 2011

	النوع	تكاليف الإنشاءات (2010 $/KW)	عامل السعة (%)	التشغيل والصيانة (2010 $/kwh)	LCE (2010 $/Kwh)
حوض قطع مكافئ	بدون تخزين	4600	20%:25%	0.02 : 0.035	0.14: 0.36
	عدد ساعات تخزين 6	7100:9800	40%:53%		
برج شمسي	من 6 الى 7.5 ساعة تخزين	6300:7500	40%:45%		0.17 : 0.29
	من 12 إلى 15ساعة تخزين	9000:10500	65%: 80%		

(Source: IRENA, June 2012)

تخفيض التكاليف من خلال إختيار الحجم الإقتصادي للمحطة (زيادة حجم المحطة)

أوضحت الدراسات أنه يمكن أن تنخفض التكاليف المحددة لمحطة حوض قطع مكافئ قدرة 50 MW ولها تخزين حراري 7.5 ساعة بنسبة % 12.1 عند زيادة القدرة إلى 100 MW وأن تنخفض التكاليف بنسبة 20.3% عند زيادة القدرة إلى 200MW ، وهذا موضح في جدول (21).

يلاحظ في جدول (21) إنخفاض تكاليف: إدارة المشروع – باقى مكونات المحطة – مجموعة القوى –الربط بالشبكة، والنتيجة إنخفاض التكاليف المحددة بين 20%، 25% إذا زادت القدرة من 50MW إلى 200MW

جدول (21) إنخفاض التكاليف عند زيادة حجم محطة حوض قطع مكافئ

البند	حجم المحطة 50MW	حجم المحطة 200 MW
المرتبات	13.9 %	11.3 %
الحقل الشمسي	30.4 %	28.8 %
التخزين الحراري	9.3 %	9.3 %
إدارة المشروع	8.3 %	2.3 %
باقى مكونات المحطة	7.7 %	4.2 %
الأعمال المدينة	7.2 %	7.2 %
مجموعة القوي	5.3 %	3.4 %
مائع نقل الحرارة	5.1 %	4.8 %
مالية المشروع	6.1 %	4.9 %
تطوير المشروع	2.7 %	0.7 %
الربط بالشبكة	2.7 %	1.5 %
أخرى	1.6 %	1.5 %
إجمالي الإستثمارات	100 %	100 %

(Source: Kistner)

حقائق:

- المحطات الأكبر تكون أكثر تكلفة فعلية من المحطات الصغيرة.
- محطة حوض القطع المكافئ بنظام تخزين تكون تكلفتها أقل بنسبة 28.6% من محطة برج شمسي بنظام تخزين.
- من المتوقع أن تكاليف محطات البرج الشمسي سوف تنخفض أكثر من تكنولوجيا محطات حوض القطع المكافئ.
- تكاليف إستثمار محطات المركزات الشمسية (CSP) بالصين $6810\ \$/kw_e$ (وهذا يكافئ ثلثي التكلفة بالمقارنة بالمحطات بأوروبا)
- تكاليف الصيانة والتشغيل لمحطات CSP بالصين تمثل 1.25% من إجمالي التكاليف الإستثمارية في السنة (ويقابله تكلفة 2% للصيانة والتشغيل بمحطات أوروبا).
- تكلفة الطاقة ذات المستوى الواحد (LCE) لمحطة قطع مكافئ قدرة 41MW بالصين تكون أقل تكلفة بنسبة 44% مقارنة بالمماثل بأوروبا.

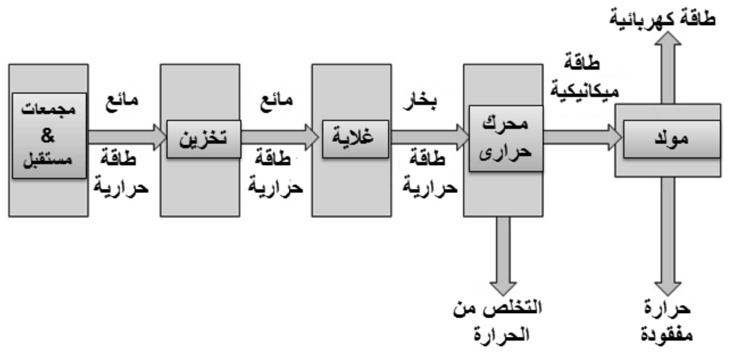
الباب الحادى عشر

إنتاج الطاقة من محطات المركزات الشمسية الحرارية

Energy Yield of Concentrated Solar Thermal Power (CSP) Plants

تقوم أنظمة إنتاج الطاقة الشمسية الحرارية (الكهربائية) بتجميع وتركيز أشعة الشمس لإنتاج الحرارة العالية اللازمة لإنتاج الكهرباء. جميع أنظمة الطاقة الحرارية الشمسية لديها مجمعات طاقة شمسية مع مكونين رئيسين : "عاكسات (المرايا)" التي تلتقط وتركز ضوء الشمس على "المستقبل" في معظم أنواع الأنظمة، يتم تسخين مائع نقل الحرارة ومروره في المستقبل والذى يستخدم لإنتاج البخار. ويتم تحويل البخار إلى طاقة ميكانيكية في التوربينات، والتي تعمل على إدارة مولد لإنتاج الكهرباء. كما أن نظم الطاقة الشمسية الحرارية لديها أنظمة تتبع والتي تعمل على تركيز أشعة الشمس على المجمعات على مدار اليوم كلما تغير موضع الشمس في السماء.

كما يمكن أن تحتوي أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية أيضا على مكونات نظام تخزين الطاقة الحرارية التي تسمح لنظام تجميع الطاقة الشمسية بتسخين نظام تخزين الطاقة خلال النهار، وتستخدم الحرارة من نظام التخزين لإنتاج الكهرباء في المساء أو أثناء الطقس الغائم. وقد تكون لمحطات الطاقة الشمسية الحرارية أيضا أنظمة هجين تستخدم أنواع الوقود الأخرى (عادة الغاز الطبيعي) لتكملة الطاقة من الشمس خلال فترات الإشعاع الشمسي المنخفض ويوضح شكل (1) تمثيل لمكونات أنظمة إنتاج الطاقة الشمسية الحرارية



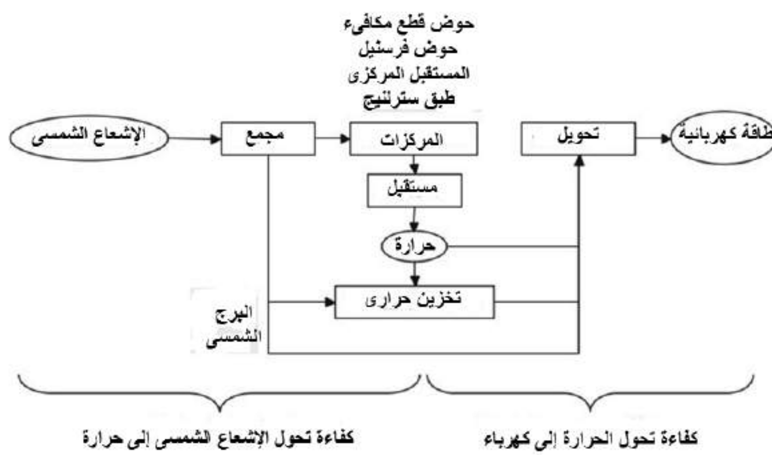
شكل (1) تمثيل لمكونات أنظمة إنتاج الطاقة الشمسية الحرارية

كفاءة محطات المركزات الشمسية الحرارية

تصنف كفاءة الإشعاع الشمسى / الكهربى (Solar- to- electricity efficiency) إلى :

- كفاءة تحول الإشعاع الشمسى إلى حرارة
(Solar – to – heat – efficiency)
- كفاءة تحول الحرارة إلى كهرباء
(Heat – to - electric efficiency)

يوضح شكل (2) هذا التصنيف

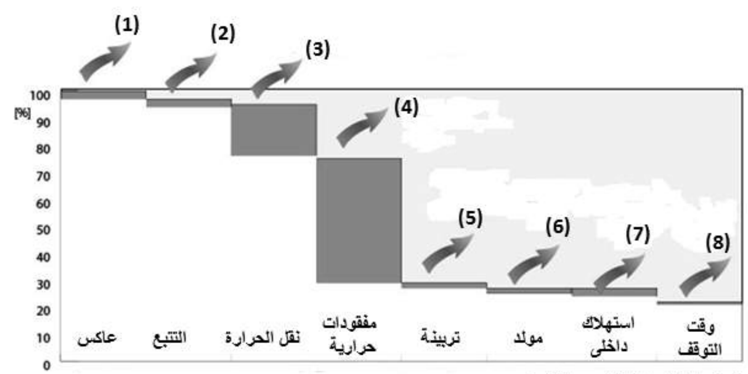


شكل (2) تصنيف أنواع كفاءة محطات المركزات الشمسية الحرارية

لحساب الكفاءة فى محطات المركزات الشمسية الحرارية، يتم أولا تحديد المفقودات، وتحدث أغلب مفقودات الطاقة فى دورة الديناميكا الحرارية والتى تكون مسئولة عن إدارة التربينة. ومن المعروف أن كفاءة دورة الديناميكا الحرارية (η_{cycle}) تتناسب مع أقصى درجة حرارة يمكن الوصول إليها بواسطة المركزات الشمسية، ويكون أكبر مكون فقد فى دورة الديناميكا الحرارية هى المفقودات الحرارية فى دورة رانكين (Rankine cycle) والتى يمكن أن تصل أقصى نسبة نظرية لها الى 64 % ويوضح الشكلين (3)& (4)أنواع مفقودات الطاقة فى أنظمةCSP ، ويتم التعبير عن الكفاءة الكلية للمحطة بكل من: كفاءة المستقبل الشمسى ، وكفاءة دورة الديناميكا الحرارية. كما فى المعادلة التالية:

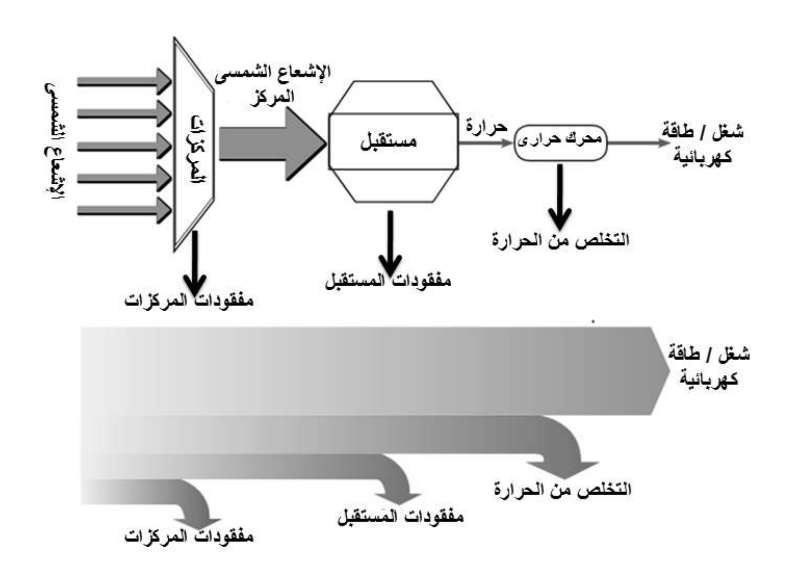


$$\eta_{CSP} = \eta_{receiver} \quad \eta_{cycle}$$



(1) ضياعات الإنعكاس و التركيز ≈% 3
(2) المفقودات نتيجة التتبع غير المثالى ≈ % 3
(3) فقد درجة الحرارة فى المائع والمبادل الحرارى ≈ % 20
(4) المفقودات الحرارية فى دورة رانكين ≈ % 60
(5) المفقودات الميكانيكية فى التربينة ≈ % 3
(6) مفقودات المولد ≈ % 3
(7) استهلاك المعدات المساعدة ≈ % 6
(8) وقت التوقف البرنامج الزمنى ≈ % 2

شكل (3) التمثيل النموذجى لمفقودات أنظمة إنتاج الطاقة الشمسية الحرارية



شكل (4) أنواع مفقودات الطاقة فى أنظمةCSP

اتزان الطاقة على المستقبل (energy balance on a receiver)

توضح المعادلة التالية معادلة اتزان الطاقة للحصول على الطاقة المفيدة (useful energy) على المستقبل، وهي الفرق بين الطاقة المستقبلة من المجمع و الطاقة المفقودة نتيجة الإشعاع (radiation) و التوصيل (convection):

$$Q_{useful} = Q_{sun} - Q_{losses}$$

حيث:

Q_{sun}= الطاقة المستقبلة من الشمس

Q_{losses} = الطاقة المفقودة

لتحديد الطاقة المستقبلة من الشمس تأتي الحاجةلعرض بعض التعريفات التالية:

الإشعاع الداخل إلى الجسم

يكون هذا الإشعاع منعكس (reflected) أو ممتص (absorbed) أو مرسل (transmitted) كما هو موضح بشكل (5)

العلاقة بين أنواع الإشعاعات كالآتي:

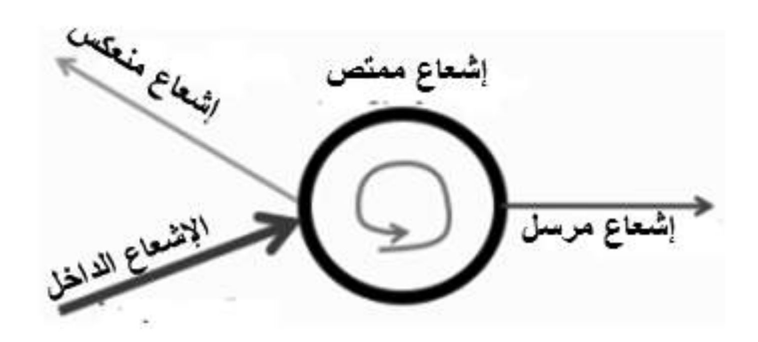
$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

حيث:

α = درجة الامتصاص (absorbance) و هي النسبة بين الفيض الممتص في الجسم إلى الفيض الداخل إلى الجسم.

τ = معامل النفاذية (transmittance) و هي النسبة بين الفيض المنقول من الجسم إلى الفيض الداخل إلى الجسم.

ρ = عامل الانعكاسية (reflectance) و هي النسبة بين الفيض المنعكس من الجسم إلى الفيض الداخل إلى الجسم.



شكل (5) تعريفات أنواع الإشعاعات

و تخضع معادلة اتزان الطاقة للآتي:

$$\mathbf{Q_{useful} = I_a\, \rho_m\, A_{ap}\, T\, \alpha_r\, R\, S - Q_{losses}} \qquad \textbf{(in W)}$$

$$\mathbf{Q_{losses} = A_r\, \epsilon\, \sigma\, T^4_{surface}} \qquad \textbf{(in W)}$$

حيث:

I_a= الإشعاع (isolation) (بوحدة W/m^2)

A_{ap} = مساحة الفتحة (aperture area)(m^2)

ρ_m= عامل الإنعكاسية للمرايا(reflection factor or reflectance)

α_r= درجة امتصاص المستقبل (absorbency or absorbance)

S= عامل ظل المستقبل (receiver-shading factor)

R= عامل منع المستقبل (receiver-intercept factor) (وهو الجزء من مساحة المجمع والذى لا يتعرض للظل أو حجب الضوء)

A_r = مساحة المستقبل (m^2)

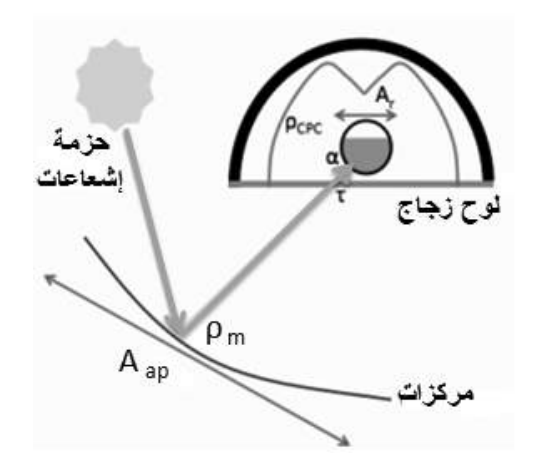
ϵ= انبعاثية المستقبل (emissivity) هي النسبة بين الفيض المشع من الجسم (بواسطة الإشعاع) والفيض الذي يمكن أن يشع من الجسم إذا كان جسم أسود عند نفس درجة الحرارة.

σ= ثابت ستيفان (Stefan's constant)

(و يساوي $5.67x10^{-6} J/s.m^2 .k^4$)

T= متوسط درجة حرارة الإشعاع (in °C)

يوضح شكل (6) بعض التعريفات المستخدمة لحساب اتزان الطاقة



شكل (6) بعض التعريفات المستخدمة لحساب اتزان الطاقة

معامل تحول الحرارة الكلي (overall heat transfer coefficient)

يتم الحصول على هذا المعامل من المعادلة التالية:

$$UL = hw + hr + Ucond$$

$$hw = 8.6\ (\mathbf{V^{0.6}}) / (\mathbf{L^{0.4}})$$

$$hr = 4\ \epsilon\ \sigma\ T^3$$

حيث:

h_w = معامل تحول الحرارة بالتوصيل (convection heat transfer coefficient)

V= سرعة الرياح (m/s)

L= طول المستقبل (m)

h_r =معامل تحول الحرارة بالإشعاع (radiation heat transfer coefficient)

المفقودات الضوئية (optical losses)

توجد أنواع مختلفة من المفقودات، بعضها راجع إلى المجال الهندسي، و الأخرى راجع إلى البيئة و الجو المحيط. من أحد أهم هذه المفقودات و التي يجب أن تؤخذ في الإعتبار هي الفقد الراجع إلى تأثير جيب التمام (cosine effect).ويوضح شكل (7) تأثير جيب التمام.

وتعرف فعالية جيب التمام من المعادلة:

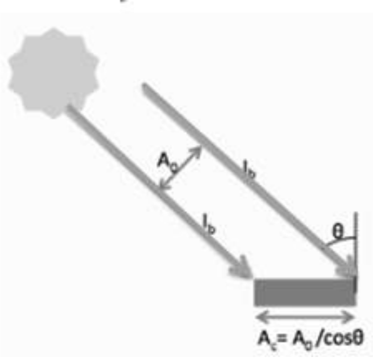
$$\epsilon_{cos} = I_c / I_b = \cos \Theta$$

حيث:

ϵ_{cos} = فعالية جيب التمام (cosine effectiveness)

I_c= الإشعاع على سطح المجمع

I_b= أشعة الحزمة (beam radiation)



شكل (7) ايضاح تأثير جيب التمام

مؤشرات الكفاءة (Efficiency Indexes)

لتحديد أداء محطات المركزات الشمسية الحرارية يلزم معرفة وحساب مؤشرات الكفاءة، وعمليا يوجد عدد خمسة كفاءات تغطى أغلب المراحل الهامة لمسار سريان الطاقة والتى توضح تأثير المكونات المختلفة بالمحطة . فيما يلى تعريف هذه الكفاءات:

الكفاءة البصرية للحقل الشمسي

والتى تقارن بين الإشعاع الساقط على الممتص والإشعاع الشمسى الواقع على المرايا

$$\eta_{Optical} = \frac{\mathbf{E}_{@absorber}}{\mathbf{E}_{sun}} = \frac{\mathbf{E}_{@absorber}}{\mathbf{A}_{ap.}\ DNI}$$

الكفاءة الحرارية للحقل الشمسي

$$\eta_{Thermal} = \frac{\mathbf{E}_{HTF}}{\mathbf{E}_{@absorber}}$$

كفاءة الأنابيب

والتى تشير الى تأثير المفقودات الحرارية بالانابيب (شاملة المفقودات الحادثة فى فترات الليل) منسوبة إلى القدرة الحرارية المنتجة من مائع نقل الحرارة

$$\eta_{Piping} = \frac{\mathbf{E}_{@boiler}}{\mathbf{E}_{HTF}}$$

الكفاءة الصافية لمجموعة القوى

وهى تعبر عن كفاءة تحويل المدخل الحرارى إلى الطاقة الكهربائية، أى الكفاءة الصافية لمجموعة القوى والمحتوية أيضا على المفقودات الحرارية للمبادل الحرارى

$$\eta_{net-PB} = \frac{\mathbf{E}_{el,net-PB}}{\mathbf{E}_{boiler}}$$

$$E_{el,net-PB} = E_{el,turb} - E_{el,pumps} - E_{el,aux_cond.}$$

كفاءة مساعدات الحقل الشمسي

وهى تعبر عن تأثير كل من استهلاك مضخات التدوير ونظام التتبع بالحقل الشمسى منسوبة إلى مخرج صافى مجموعة القوى

$$\eta_{aux-SF} = \frac{E_{el,net-PB} - E_{el,aux-SF}}{E_{el,net-PB}}$$

من هذه الكفاءات الخمسة نحصل على الكفاءة الكلية للمحطة أى الكفاءة الحرارية / الكهربائية

$$\eta_{Overall} = \eta_{Optical} \cdot \eta_{Thermal} \cdot \eta_{Piping} \cdot \eta_{net-PB} \cdot \eta_{aux-SF}$$

$$= E_{el,annual} / E_{sun} \quad = P_{net} / E_{sun}$$

من هذه المعادلة نحصل على الطاقة المنتجة من محطات المركزات الشمسية الحرارية

حيث :

DNI= الإشعاع العادي المباشر(direct normal irradiance)

A_{ap}= مساحة فتحة المجمع(aperture area of the collector)

$E_{@absorber}$= الطاقة المصطدمة عند الممتص (energy impinging on the absorber)

= أو القدرة النظرية المتاحة على سطح أنابيب الأمتصاص

E_{sun}= الطاقة المصطدمة عند المرايا(energy impinging on the mirror)

= أو القدرة الحرارية الصافية المحولة إلى المائع

E_{HTF}= طاقة مائع نقل الحرارة(energy to the HTF)

$E_{@boiler}$= الطاقة الحرارية الداخلة إلى مجموعة القوى (thermal input to the PB)

$E_{el, net-PB}$=صافى الطاقة الكهربائية لمجموعة القوى

$E_{el, turb}$= فى دورة رانكين الشائعة (مياه / بخار) تعرف بأنها المخرج الكهربى لتربينة البخار

$E_{el, pumps}$=استهلاك مضخات مياه التغذية والتكثيف (condensate and feed-water pumps consumption)

$E_{el, aux_cond.}$ = استهلاك مساعدات المكثف (condenser auxiliaries consumption)

$E_{el, annual}$= P_{net} = صافى الطاقة الكهربائية السنوية للمحطة

جميع مؤشرات الكفاءة يمكن أن تستخدم فى :

الحالات العادية والتى فيها تكون جميع المتغيرات كقدرة (watt)

حالات الاتزان السنوى للطاقة والتى فيها تكون المتغيرات كطاقة (Joule)

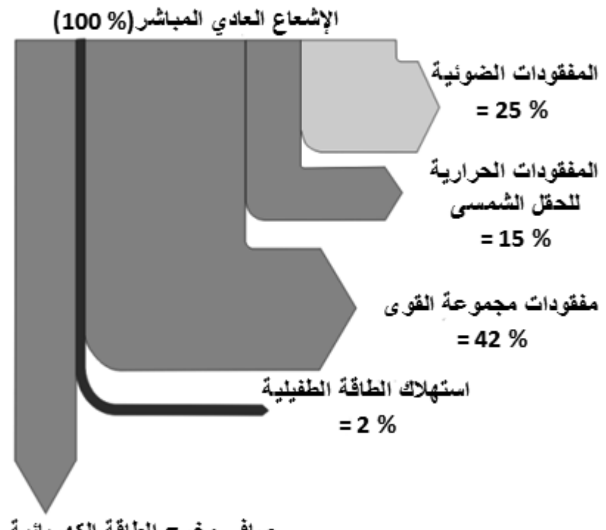
مخطط سانكي للطاقة المنتجة (Sankey diagram for Energy Yield)

هو مخطط بياني يوضح سريان الطاقة المنتجة من محطة مركزات شمسية حرارية أخذا في الإعتبار نوع ونسبة المفقودات المختلفة (تنسب تسمية هذا المخطط إلي الكابتن الايرلندي " ماتيو هنري ريال سانكي" الذي استخدم هذا النوع من الرسم في عام 1898 لتوضيح كفاءة استخدام الطاقة في محرك بخاري)

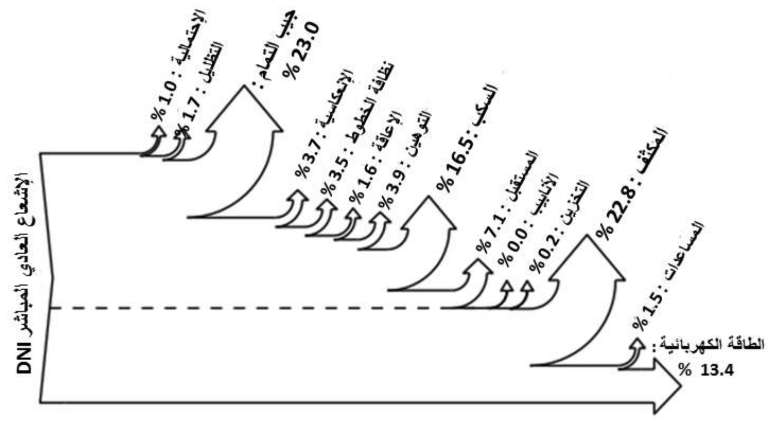
يوضح شكل (8) سريان الطاقة التقريبى فى محطة مركزات شمسية حرارية حوض قطع مكافىء (قيم متوسطة)

ويوضح شكل (9) مخطط سانكى للطاقة المنتجة ونسبة المفقودات لمحطةبرج الطاقة المركزى (Gemasolar – 20 MW_e)(Spelling 2011)

بينما يوضح شكل (10) مثالين لتوزيع نسبة المفقودات فى المكونات الرئيسية لمحطات طبق قطع مكافىء

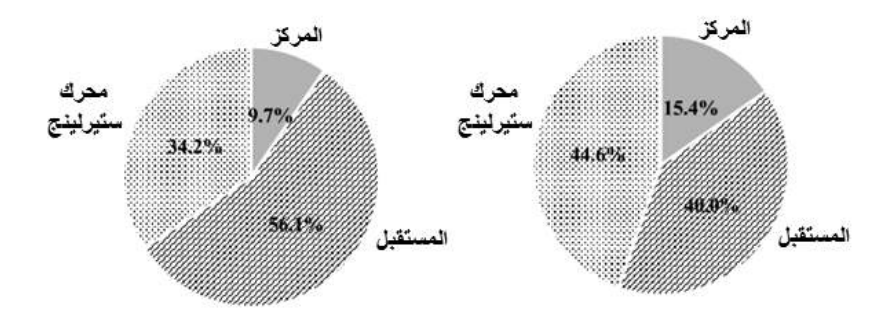


شكل (8) سريان الطاقة التقريبى فى محطة مركزات شمسية حرارية حوض قطع مكافىء (قيم متوسطة)



شكل (9) مخطط سانكى للطاقة المنتجة ونسبة المفقودات لمحطة برج الطاقة المركزي

(Gemasolar – 20 MW_e) (Spelling 2011)



شكل (10) مثالان لتوزيع نسبة المفقودات فى المكونات الرئيسية لمحطات طبق قطع مكافيء

كفاءة إستخدام الأرض لمحطات CSPs

توضح المعادلات التالية حساب كفاءة الإشعاع الشمسى / الكهربى لمحطات CSPs بالنسبة لمساحة الأرض المطلوبة، هذه الكفاءة تعني كفاءة تحويل الإشعاع الشمسي إلي كهرباء (solar to electricity conversion efficiency)

كفاءة الإشعاع الشمسي/الكهربى = (صافي الإنتاج السنوي للطاقة) ÷ (الإشعاع المباشر السنوي على فتحات المجمعات)

عامل إستخدام الأرض = (مجموع مساحات فتحات العاكسات (المجمعات)) ÷ (مساحة الأرض الكلية المطلوبة)

كفاءة إستخدام الأرض = (كفاءة الإشعاع الشمسي / الكهربى)× (عامل إستخدام الأرض)

يوضح جدول (1):

كفاءة الإشعاع الشمسي / الكهربى

(Solar electric aperture related efficiency)

وعامل إستخدام الأرض (land use factor)

وكفاءة إستخدام الأرض (land use efficiency) وذلك للتكنولوجيات المختلفة لمجمعات CSPs ومجموعة القوى (power cycle). ويوضح جدول (2)خصائص أداء أنواع محطات المركزات الشمسية

جدول (1)كفاءة الإشعاع الشمسي / الكهربى، عامل إستخدام الأرض وكفاءة إستخدام الأرض لتكنولوجيات CSPs مختلفة

نوع المجمع – دورة الكهرباء	كفاءة الإشعاع الشمسي / الكهربى منسوبا إلى الفتحات	عامل إستخدام الأرض	كفاءة إستخدام الأرض
- حوض قطع مكافئ - دورة بخار	11-16 %	25 – 40 %	3.5 - 5.6 %
- مستقبل مركزي - دورة بخار	12 – 16%	20 – 25 %	2.5 - 4.0 %
- فرسنل خطي - دورة بخار	8 – 12 %	60 –80 %	4.8 - 9.6 %
- مستقبل مركزي - دورة مركبه	20 – 25 %	20 – 25 %	4.0 - 6.3 %
- مصفوفة أبراج شمسية متعددة - - دورة بخار أو دورة مركبة	15 – 25 %	60 – 80 %	9.0 - 20.0 %

(Source: solar paces conference Berlin, September 2009)
(Global potential of CSP)

جدول (2)خصائص أداء أنواع محطات المركزات الشمسية

نوع التكنولوجيا	حدود السعة (MW)	نسبة التركيز	أقصي كفاءة حرارية (%)	كفاءة الحرارة / كهرباء (%)	إستخدام الارض (m² /MWha)
حوض قطع مكافئ	10-200	70-80	21	10-15	6-8
عاكس فرسنل	10-200	25-100	20	9-11	4-6
برج الطاقة	10-150	300-1000	20	8-10	8-12
طبق ستيرلنج	0.01-0.4	1000-3000	29	16-18	8-12

التأثيرات البيئية(Environmental impacts)

تقدر أنبعاثات CO_2 من محطات المركزات الشمسية الحرارية بـ 17 g / kwhمقارنة بـ 776 g / kwh من محطات الكهرباء التى تستخدم الفحم، و 396 g / kwh من محطات الدورة المركبة التى تعمل بالغاز الطبيعى.

ومع ذلك يجب مراعاة أن بعض محطات المركزات الشمسية الحرارية تستخدم الوقود الأحفورى كدعم احتياطى، ولذا لا يمكن اعتبارها كمحطة "بلا انبعاثات".

وقد ذكر فى آفاق تكنولوجيا الطاقة (Energy Technology Perspectives 2008) بالسيناريو الأزرق ان محطات CSPs سوف توفر سنويا حوالى 1260 M $tonCO_2$أى 7% من إجمالى 18 G $tonCO_2$التى يمكن تلافيها من إنتاج الكهرباء (منسوباًإلى السيناريو المرجعى). بالإضافة إلى تجنب الانبعاثات الملوثة الأخرى مثل: NO_x SO_x

الباب الثانى عشر
تطبيقات محطات قوى مجمعات حوض قطع مكافئ

(1) المحطة الشمسية الحرارية بالكريمات (جمهورية مصر العربية)

تعد أكبر مشروع ضمن 3 مشروعات تم تنفيذها على مستوى قارة أفريقيا فى المغرب والجزائر ومصر، وتعتمد على ارتباط الدورة المركبة بالحقل الحرارى الشمسى.

- يبلغ إجمالى مساحة الحقل الشمسى 644 ألف مترمربع
- عدد موديولات المجمعات الشمسية 1920وتحتوى على 53760 مرايا.
- بلغت نسبة التصنيع المحلى فى المكون الشمسى نحو % 50
- قدرة المشروع 140 ميجا وات منها 20 ميجا وات مكون شمسى

بدأ تشغيل المحطة تجارياً إعتباراً من 2011/6/30

تم اختيار موقع الكريمات جنوب الجيزة لما له من مميزات أهمها:

(1) أرض صحراوية غير مأهولة

(2) شدة إشعاع شمسي مباشر تصل إلى 2400 ك.و. س./ م^2/ سنة

(3) شبكة كهربائية ممتدة وشبكة غاز طبيعي

(4) القرب من مصدر مياه (نهر النيل).

تم استخدام تكنولوجيا مركزات القطع المكافئ الإسطوانى بالإرتباط بالدورة المركبة التي تستخدم الغاز الطبيعي كوقود.

التصميم الهندسي للمشروع :

مكون الدورة المركبة:

- عدد (2) تربينة غازية قدرة كل منهما حوالى 41.5 ميجاوات تستخدم الغاز الطبيعى كوقود أساسى لتوليد الكهرباء بالإضافة إلى إمكانية استخدام المازوت كوقود بديل.
- عدد (2) وحدة استرجاع الحرارة وتوليد البخار (HRSG)، وتتكون من عدة مراحل (مبادلات حرارية) لتوليد البخار وتحميصه (بواسطة

حرارة غازات عادم التربينة الغازية) على مستويين مختلفين من الضغط.

- تربينة بخارية بقدرة 67 ميجاوات تستقبل البخار الناتج من وحدتي استرجاع الحرارة لتوليد الكهرباء.
- يتم تكثيف البخار الخارج من التربينة البخارية في المكثف، حيث يتم ضخ المياه المكثفة إلى نازع الغازات (Deaerator) ومنه يتم ضخ مياه التغذية مرة أخرى إلى وحدتي استرجاع الحرارة لاستكمال دورة إنتاج البخار.

الحقل الشمسى بالمحطة الشمسية الحرارية لتوليد الكهرباء - الكريمات

المساحة الكلية للمحطة $640\ m * 900\ m = 576000\ m^2$

مساحة المجمعات = $131000\ m^2$

النسبة بين المساحة الكلية إلى مساحة المجمعات 4.4

إجمالي عدد الحلقات= 40 loop =11+11+9+9

كل حلقة صفين تحتوي على 48 موديول

الحلقة (loop) = 2 row
= 24+24 module

الصف (row) = 2 SCA

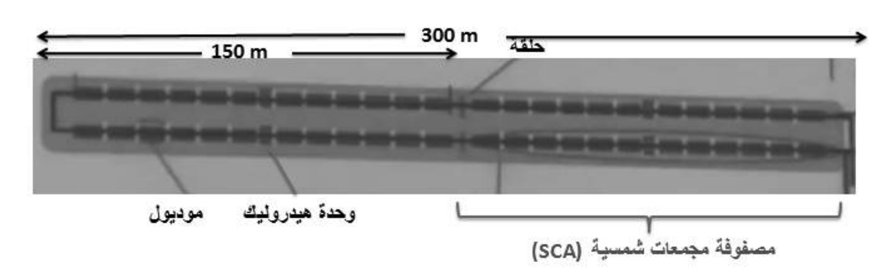
إجمالي عدد الموديولات = 40 loop × 48 module = 1920 module

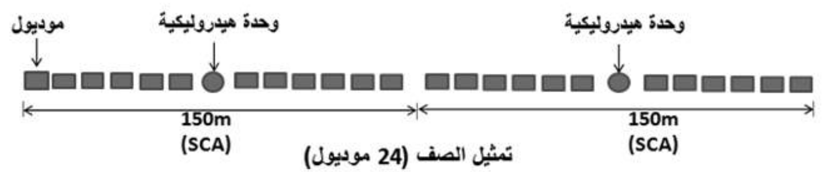
كل حلقة مقسمة إلى 4 مصفوفات ، كل مصفوفة 6 موديولات + 6 موديولات بينهما وحدة هيدروليكية

(المصفوفة: (Solar Collector Assembly or Array (SCA)

أي أن الحلقة تتكون من صفين ، كل صف مصفوفتين ، كل مصفوفة 12 موديول مجمع ووحدة هيدروليكية (الوحدة الهيدروليكية مسئولة عن تتبع الحلقة)، طول الصف 300 m وطول المصفوفة 150 m

ويوضح شكل (1) الحلقة المكونة من 4 مصفوفات مجمعات شمسية (SCA)





شكل (1) الحلقة المكونة من 4 مصفوفات مجمعات شمسية (SCA)

كل 12 موديول ووحدة هيدروليكية يطلق عليها مصفوفة (SCA):

طولها 150m ومساحتها $817m^2$

كل موديول يحتوي على 7×4 مرايات = 28 مرايا

مقاس المرايا = 1.7 m× 1.6 m × (4-5 mm)

مساحة الموديول = $1.7×1.6× 28 = 76.16\ m^2$

عدد المصفوفات (SCA) = (40 حلقه)× (4 مصفوفة)

= 160 مصفوفة

مساحة فتحة المصفوفة (المجمع) = $817\ m^2$

مساحة المجمعات الشمسية = $817× 160 = 130720\ m^2$

$\approx 131000\ m^2$

البيانات الفنية للحقل الشمسي بالكريمات:

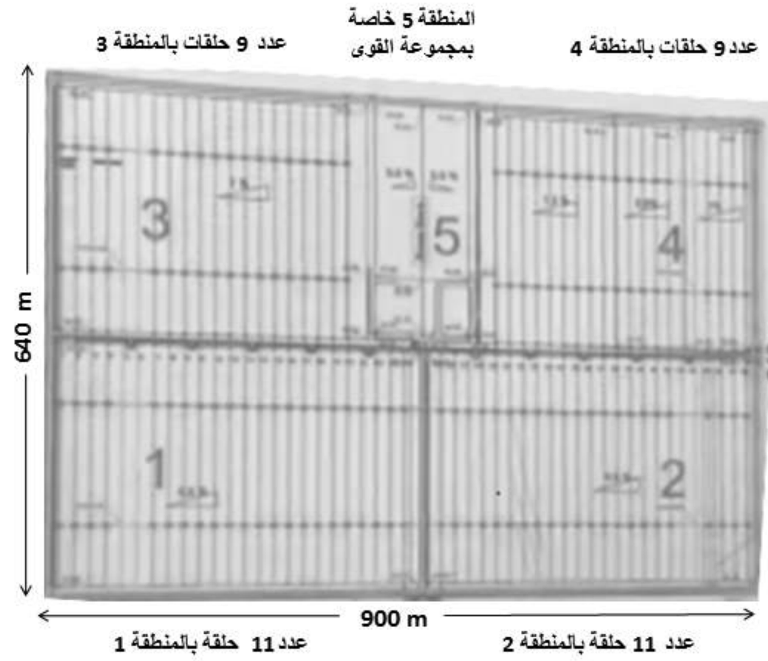
الحقل مقسم إلى 4 مناطق للحلقات بالاضافة إلى منطقة خامسة لمجموعة القوى كما فى شكلى (2) & (3)

- عدد الحلقات = 40
- عدد مصفوفات المجمع الشمسي / الحلقة = 4
- إجمالي عدد مصفوفات المجمع الشمسي (SCA) = 160
- عدد الموديلات / مصفوفة = 12

- إجمالي عدد موديلات المجمع الشمسي = 1920
- المساحة الفعلية الكلية للمرايات = $131000\ m^2$
- أقصى مخرج للطاقة الحرارية من المجال الشمسي = $61\ MW_{th}$
- أقصى مخرج طاقة كهربائيه = $20\ MW_{el}$
- درجة حرارة مدخل المائع = $293°\ C$
- درجة حرارة مخرج المائع = $393°\ C$
- نوع المائع = أملاح ذائبة



شكل (2) الحقل الشمسى بالمحطة الشمسية الحرارية لتوليد الكهرباء - الكريمات



شكل (3) تقسيم الحقل الشمسى بالمحطة الشمسية الحرارية لتوليد الكهرباء – الكريمات

(2) وحدة تجريبية لإنتاج الطاقة وتحلية المياه باستخدام نظام المركزات الشمسية

Multipurpose Applications by Thermodynamic Solar (MATS)

مدينة الأبحاث العلمية والتطبيقات التكنولوجية – برج العرب - الاسكندرية

فى مجال توطين تكنولوجيا المركزات الشمسية وفى إطار اتفاقية التعاون بين أكاديمية البحث العلمى والتكنولوجيا والوكالة الإيطالية ENE ، تم إعداد مقترح محطة شمسية تجريبية متعددة الأغراض (توليد كهرباء،تحلية مياه) بإستخدام تكنولوجيا الأملاح المذابة كمائع ناقل للحرارة ووسيط تخزين ، يهدف المشروع إلى تصميم وبناء وحدات مركزات شمسية متعددة الأغراض بأحدث الأساليب

التكنولوجية والقائمة على الابتكار لإنتاج الطاقة الكهربائية بقدرة واحد ميجاوات. وتقوم الوحدة بتحلية 250 متر مكعب فى اليوم، وقد تقرر بناء المشروع بمدينة الأبحاث العلمية والتطبيقات التكنولوجية بمدينة برج العرب الجديدة الأسكندرية.

الطاقة الكهربائية المنتجة ستوزع كالأتى:

- 200 كيلو وات لتغذية مساعدات المشروع
- 800 كيلو وات لتغذية أحمال مدينة الأبحاث العلمية والتطبيقات التكنولوجية

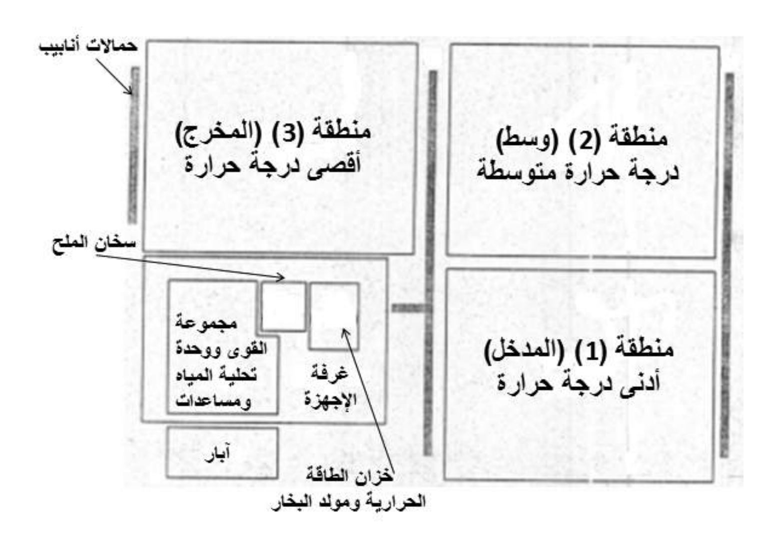
تتكون المحطة كما فى شكل (4) من:

- الحقل الشمسى:

- منطقة (1) (المدخل) أدنى درجة حرارة
- منطقة (2) (وسط) درجة حرارة متوسطة
- منطقة (3) (المخرج) أقصى درجة حرارة

- مجموعة القوى ووحدة تحلية المياه ومساعدات (على مستوى (4-) متر)
- خزان الطاقة الحرارية ومولد البخار(على مستوى (11-) متر)
- سخان الملح (على مستوى (6.5-) متر)

يستخدم الغاز الطبيعى فى حالة صيانة الحقل الشمسى أو عدم إنتاج الطاقة الشمسية لفترة طويلة وذلك للحفاظ على الحالة السائلة لمحلول الملح المذاب المستخدم لتخزين ونقل الطاقة الحرارية من الطاقة الشمسية.



شكل (4) تمثيل للمواقع الأساسية لوحدة MATS

مكونات الحقل الشمسى :

- عدد 18 مصفوفة مجمع شمسى (SCA) طول كل مصفوفة 100 m
- المساحة الكلية لأحواض المجمعات الشمسية 10000متر مربع
- المُستقبِل (الممتص):

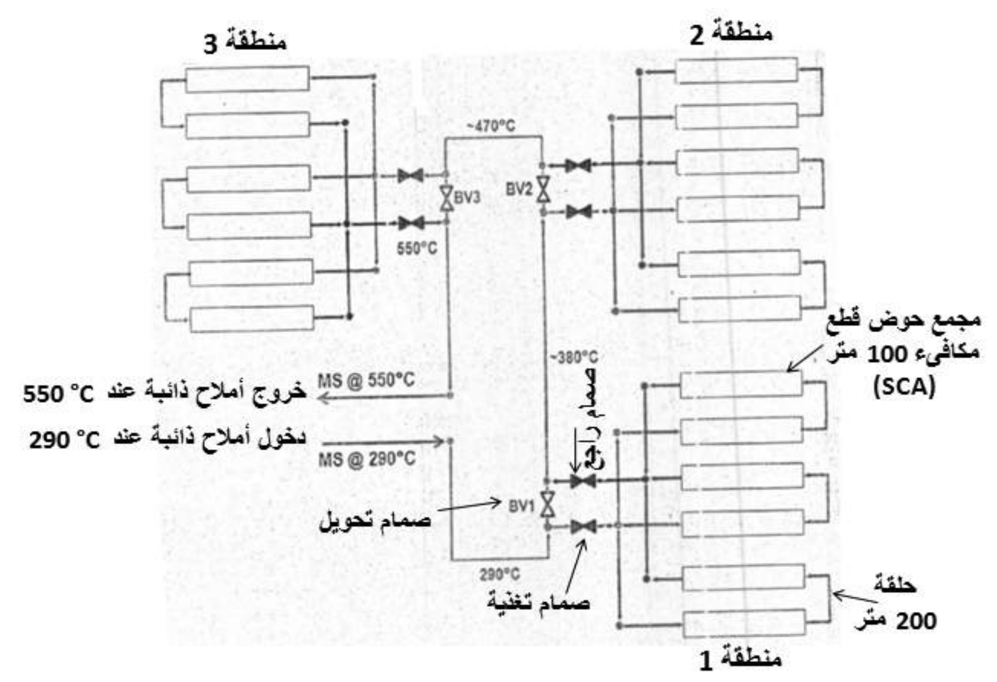
- مواسير استينلس ستيل مدهونة بمادة تساعد على امتصاص حرارة الشمس ومغلفة بمواسير من الزجاج لها نفاذية عالية ومفرغ الهواء بينهما.
- الماسورة موضوعة في بؤرة مرايا تعكس أشعة الشمس
- المواسير والمرايا مركبة على هيكل معدني يتم إدارته بنظام هيدروليكي دقيق لتتبع حركة الشمس من خلال حساسات لحركة الشمس

- المياه المحلاة تستخدم في:

* تعويض مياه تغذية مولد البخار
* نظافة المرايا
* استخدامات معامل مدينة الأبحاث العلمية والتطبيقات التكنولوجية

- تستخدم الأملاح المذابة كمائع لنقل الحرارة

يوضح شكل (5) ترتيبة المجال الشمسى لوحدة MATS



شكل (5) ترتيبة المجال الشمسى لوحدة MATS

ملحق
المحطات البخارية
(Steam power plant)

إن عملية إنتاج الطاقة الكهربائية هي عملية تحويل الطاقة من شكل الى آخر حسب مصادر الطاقة المتوفرة في مراكز الطلب على الطاقة الكهربائية وحسب الكميات المطلوبة لهذه الطاقة، الأمر الذي يحدد أنواع محطات الانتاج وكذلك أنواع الاستهلاك وأنواع الوقود ومصادره كلها تؤثر في تحديد نوع المحطة ومكانها وقدرتها.

أنواع محطات إنتاج الكهرباء :

1. محطات الإنتاج البخارية.
2. محطات الإنتاج النووية.
3. محطات الإنتاج المائية.
4. محطات الإنتاج من المد والجزر
5. محطات الإنتاج ذات الاحتراق الداخلي (ديزل – غازية)
6. محطات الإنتاج بواسطة الرياح.
7. محطات الإنتاج بالطاقة الشمسية.

المحطات البخارية

- تستعمل انواع مختلفة من الوقود حسب النوع المتوافر مثل: الفحم - البترول السائل - الغاز الطبيعي
- تتصف المحطات البخارية بكبر حجمها ورخص تكاليفها (مقارنة بالانواع الاخري)
- الفارق بين المحطات البخارية هو كيفية نقل وتخزين وتداول وحرق الوقود
- العوامل المؤثرة علي اختيار الموقع المناسب للمحطة:

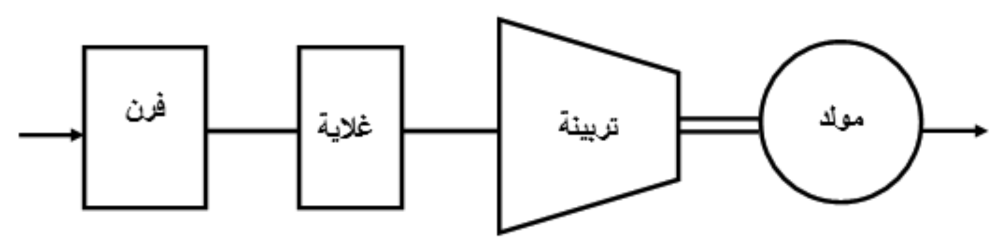
- ❖ القرب من مصادر الوقود المتاحه وسهولة نقله وتوافر وسائل النقل
- ❖ القرب من مصادر مياه التبريد (حيث يحتاج المكثف الي كميات كبيرة من مياه التبريد) لذلك تبني هذه المحطات عادة علي شواطئ البحار او بالقرب من مجاري مائية.

وتعتمد المحطات البخارية على استعمال نوع الوقود المتوفر وحرقه في أفران خاصة لتحويل الطاقة الكيميائية في الوقود الى طاقة حرارية في اللهب الناتج من عملية الاحتراق ثم استعمال الطاقة الحرارية في تسخين المياه في غلايات خاصة (BOILERS)وتحويلها الى بخار في درجة حرارة وضغط معين ثم تسليط هذا البخار على توربينات بخارية صممت لهذه الغاية فيقوم البخار السريع بتدوير محور التوربينات وبذلك تتحول الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية على محور هذه التوربينات . يربط محور المولد الكهربائي ربطا مباشرا مع محور التوربينات البخارية فيدور محور المولد الكهربائي بنفس السرعة وباستغلال خاصية المغناطيسية للعضو الدوار (ROTOR) من المولد والجزء الثابت (STATOR)منه تتولد على طرفي الجزء الثابت من المولد الطاقة الكهربائية اللازمة ..

لا يوجد فوارق أساسية بين المحطات البخارية التي تستعمل أنواع الوقود المختلفة إلا من حيث طرق نقل وتخزين وتداول وحرق الوقود . وقد كان استعمال الفحم الحجري شائعا في أواخر القرن الماضي وأوائل هذا القرن ، إلا أن اكتشاف واستخراج البترول ومنتجاته احدث تغييرا جذريا في المحطات الحرارية حيث اصبح يستعمل بنسبة تسعين بالمئة لسهولة نقله وتخزينه وحرقة إن كان بصورة وقود سائل أو غازي

المكونات الرئيسية للمحطات البخارية

يوضح شكل (1) المكونات الاساسية بالمحطه البخارية



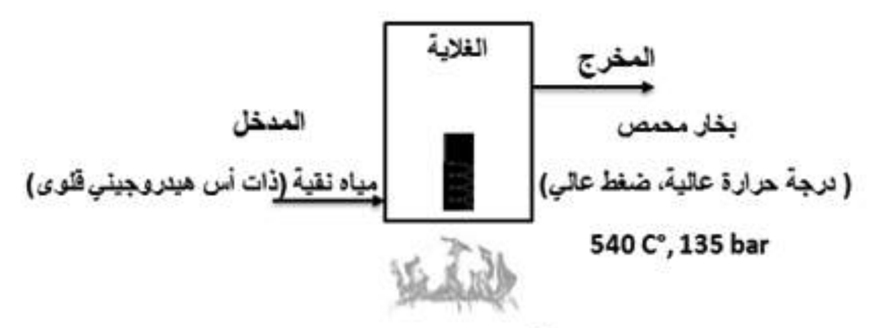
شكل (1) المكونات الاساسية بالمحطه البخارية

1. الفرن (Furnace)

عبارة عن وعاء لحرق الوقود ، يختلف في الشكل والنوع طبقا لنوع الوقود المستخدم ، وملحق به وسائل تخزين ونقل وتداول الوقود ، والتخلص من المخلفات . ويكون عمل الفرن تحويل الطاقه الكيميائية في الوقود الي طاقه حرارية في اللهب الناتج عن عملية الاحتراق ثم استعمال الطاقه الحرارية في تسخين المياه في الغلايات

2. الغلاية (Boiler)

تقوم بانتاج بخار محمص أو جاف Super-heated steam / Dry steam
يوضح شكل (2) تمثيل الغلاية

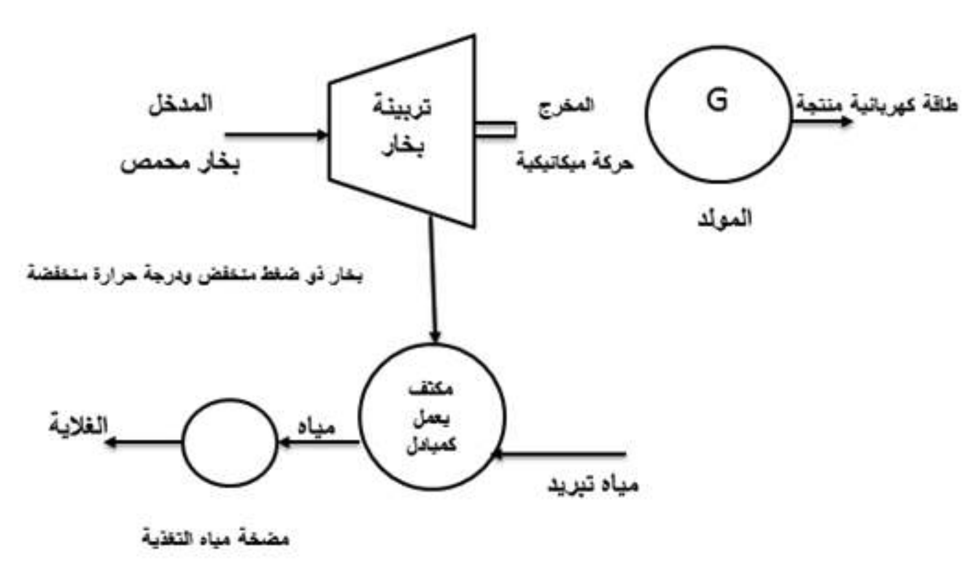


شكل (2) تمثيل الغلاية

3. التربينة (Turbine) الحرارية

تقوم التربينة بتحويل الطاقة الحرارية الموجودة في البخار الي طاقه

ميكانيكية متمثلة في تدوير محور التربينة المتصلة ميكانيكيا بالمولد فيدور منتجا الطاقه الكهربائية، كما هو واضح بشكل (3)



شكل (3) تمثيل التربينة البخارية

4. المكثف Condenser

يكثف البخار ذي الضغط المنخفض ودرجة حرارة منخفضة الخارج من التربينة ويتحول الي مياه ويضخ الي الغلايه ليعاد تسخينه من جديد

فكرة المكثف:

- تأخذ المياه الباردة من البحر أو النهر (بدون تنقية سوي مرشحات لحجز الشوائب) وتمر بمواسير داخل المكثف
- يمر البخار المراد تكثيفه حول مواسير التبريد
- عن طريق التبادل الحراري يكتسب الماء البارد الحرارة الموجودة في البخار حتي يتكثف
- بمجرد ان يتحول هذا البخار الي مياه فان مضخة مياه التغذية (boiler feed pump) تضخ هذه المياه من جديد الي الغلاية ليعاد تسخينه من جديد

5. برج التبريد (Cooling tower)

يستخدم برج التبريد مع المكثف لتخزين مياه تبريد لتغذية المكثف وذلك بالمحطات غير الواقعة علي مصدر لمياه التبريد بجوار المحطه الحرارية

6. المدخنة (Chimney)

هي مدخنة من الطوب الحراري اسطوانية الشكل مرتفعة جدا ، تقوم بطرد غازات الاحتراق الي الجو علي ارتفاع شاهق جدا بحيث يتم تقليل تلوث البيئة المحيطة بالمحطه.

7. المولد الكهربى (Generator)

يتكون المولد من عضو دوار (rotor) متصل مباشرة مع محور التربينة ، وعضو ثابت (stator) عن طريق ملفات العضوين الدوار والثابت يتحول المجال المغناطيسي الدوار الي تيار كهربي (الطاقه الكهربائية) علي طرفي ملف العضو الثابت.

تعتبر محطة كهرباء شبرا الخيمة "البخارية" لتوليد الطاقة الكهربائية، واحدة من أكبر وأهم المحطات البخارية في الشرق الأوسط وأفريقيا وأقدمها أيضًا، إذ تبلغ قدرتها 1300 ميجاوات، وتمثل 4% من إجمالي الطاقة الكهربائية المولدة في مصر وحوالي 16% بالنسبة للقاهرة. يوضح شكل (4) محطة كهرباء شبرا الخيمة "البخارية"، ويوضح شكل (5) محطة الكريمات "البخارية"



شكل (4) محطة كهرباء شبرا الخيمة "البخارية"



شكل (5) محطة الكريمات "البخارية"

References

[1]UNDERSTANDING SOLAR CONCENTRATORS

By George M. Kaplan

Technical Reviewers,Dr. Thomas E. Bowman,Dr. Maurice Raiford,JesseRibot

Illustrated By Rick Jali

[2]http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter09/chapter09.html

[3]http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/oem-wp009_-en-p.pdf

[4]http://www.appropedia.org/Understanding_solar_concentrators

[5]http://cleanleap.com/7-solar-technology-assessment-and-appropriate-technology-options/71-solar-thermal-technology

[6]https://inhabitat.com/nevadas-new-molten-salt-solar-plant-will-produce-power-long-after-the-sun-sets/moltensalt/

[7]http://www.renewableenergyfocus.com/view/17095/csp-developments-in-heat-transfer-and-storage-materials/

[8]http://solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2607877

[9]http://research3.fit.edu/nhc/documents/TES_NAI_Journal_Final.pdf

[10]http://mechanicalinventions.blogspot.com.eg/2014/07/one-axis-tracking-concentrator.html

[11]http://www.industrial-solar.de/content/en/maerkte/fresnel-collector/

[12]https://www.researchgate.net/publication/273696030_Dynamic_Modelling_of_Concentrated_Solar_Field_for_Thermal_Energy_Storage_Integration

[13]http://www.ee.co.za/article/linear-fresnel-systems-future-csp.html

[14]http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115302494

[15]https://www.geni.org/globalenergy/research/review-and-comparison-of-solar-technologies/Review-and-Comparison-of-Different-Solar-Technologies.pdf

[16]http://www.solarcellcentral.com/csp_page.html

[17]http://www.alpha-e.com/at350-specifications.html

[18]http://landartgenerator.org/blagi/archives/2004

[19]https://en.wikipedia.org/wiki/Frank_Shuman

[20] http://www.skyfuel.com/en/technology/csp-101/

[21]https://www.slideshare.net/swapnil_energy/concentrated-solar-power-technologies-csp-11509061

[22]https://www.slideshare.net/asertseminar/solar-thermal-power

[23]https://newenergyportal.wordpress.com/category/solar-energy/

[24]https://www.nextbigfuture.com/2007/06/solar-cells-with-407-efficiency-made-58.html

[25]https://www.ecnmag.com/article/2013/11/cpv-technology-today-and-tomorrow

[26]https://sites.google.com/site/qasp22/comparison-of-pv-and-csp

[27]https://www.researchgate.net/publication/311970734_Parametric_analysis_of_a_hybrid_solar_concentrating_photovoltaicconcentrating_solar_power_CPVCSP_system

[28]https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power#Efficiency

[29]https://www.slideshare.net/IntertechPira/beninga-worleyparsons

[30]NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC. Contract No. DE-AC36-08GO28308

Utility-Scale Parabolic Trough Solar Systems: Performance Acceptance Test Guidelines .April 2009 — December 2010

David Kearney Kearney& Associates Vashon, Washington

[31]Technical Manual for the SAM Physical Trough Model

Michael J. Wagner and Paul Gilman

[32]Estimating the Performance and Economic Value of Multiple Concentrating Solar Power Technologies in a Production Cost Model Jennie Jorgenson, Paul Denholm, Mark Mehos, and Craig Turchi

[33]Guidelines for CSP Yield Analysis – Optical Losses of Line Focusing Systems; Definitions, Sensitivity Analysis and Modeling...

Conference Paper in Energy Procedia · January 2013

DOI: 10.1016/j.egypro.2014.03.141 · Source: DLR

[34]Concentrated Solar Thermal Power

AnjaneyuluKrothapalli Department of Mechanical Engineering

Florida State University, Tallahassee, FL 32310 BrentonGreska

Sustainable Energy Technologies, LLC

St. Cloud, FL 34771

[35]Concentrated solar power plants: Review and design methodology H.L. Zhang ,J.Baeyens , J.Degr eve , G.Caceres

Renewable and Sustainable Energy Reviews 22 (2013) 466–481

[36]Global Potential of Concentrating Solar Power

Franz Trieb, Christoph Schillings, Marlene O'Sullivan, Thomas Pregger, Carsten Hoyer-Klick

SolarPaces Conference Berlin, September 2009

[37]Simplified Methodology for Designing Parabolic Trough Solar Power Plants

Ricardo Vasquez Padilla

University of South Florida, rsvasque@mail.usf.edu

[38]An investigation on factors influencing dust accumulation on CSP mirrors

S. Pennetta, , S. Yu, , P. Borghesani, , M. Cholette, , John Barry, and , and Z. Guan

Published by the American Institute of Physics

[39]EUROTROUGH - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation

Michael Geyer ,EckhardLüpfert,

[40]Analysis & Design of Parabolic Trough Solar Thermal Power Plant for Typical Sites of Pakistan

Engr. ShahrukhSaleem, Prof. Dr. AzzamulAsar

[41]Reflector Soiling and Cleaning Methods

Fabian Wolfertstetter, DLR

@ SFERA Summer School

Hornberg, May 15th – 16th 2013

[42]Advanced CSP Teaching Materials

Chapter 6

Linear Fresnel Technology

Author

Matthias Günther

[43]Solar Engineering of Thermal Processes

Fourth Edition

John A. Duffie (Deceased)

Emeritus Professor of Chemical Engineering

[44]https://www.google.com.eg/url?

[45]http://www.google.com/patents/US20130220303

[46]https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-24-14-a985

[47]https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_tower

[48]
https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=24

[49]http://www.seminarsonly.com/mech%20&%20auto/solar-power-towers-seminar-report-ppt.php

[50]https://hub.globalccsinstitute.com/publications/development-solar-and-wind-power-karnataka-and-tamil-nadu/71-solar-thermal-technology

[51]http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter10/chapter10.html

[52]http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter01/chapter01.html

[53]http://www.powertakeoff.com/blog/energy-efficiency-cheapest-fuel/

[54]http://www.marketoracle.co.uk/Article38024.html

[55]https://www.marefa.org/

[56]https://www.e-education.psu.edu/eme811/node/682

[57]http://turnkey-innovations.com/comparison-pv-csp/

[58]https://www.e-education.psu.edu/eme811/node/682

[59]http://file.scirp.org/Html/7-6201461_31251.htm

[60]https://www.slideshare.net/drpmills/81-to-84-2012

[61]https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CSP_Essentials.pdf

[62]European Concentrated Solar Thermal Road-Map (ECOSTAR SES6-CT-2003-502578), DLR

[63]Farah AL-Chaaban, Ahmed Ghamrawi, ChaibanHaykal and NazihMoubayed"Comparative study on PV and Thermal solar energy concentrators" (EEECEGC 2013), 2013

[64]Renewable energy technologies; cost analysis series concentrating solar power

IRENA, June 2012

[65]Towards cost reduction in CSP: innovative design for an efficient Fresnel based solar failed.

BUBEN ABBAS CAMARA

Ingeniero industrial

By: prof. Martinez-Val Penlosa, Madrid.

[66]Receiver Design Methodology for solar Tower plants

Joseph Stalin Maria Jebamalai

SE-10044, Stockholm, August 2016

رقم الإيداع

بدار الكتب والوثائق القومية

2018 /16100

مطبعة

Crest Press

عنوان المطبعة:١، شارع الاربعين، من جسر السويس، بجوار حديقة بدر

تليفون: ٠٢ ٢٢٩ ٧٠ ٠٦٢